

**Fábio Emanuel Gil Velhinho**

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica



## **ANÁLISE DA VIDA À FADIGA DE LIGAÇÕES SOLDADAS EM T**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Rui Fernando dos Santos Pereira Martins, Prof. Doutor, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira

Arguentes: Prof. Doutor Luís Filipe Galvão Reis

Prof. Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos

Vogais: Prof. Doutor Luís Filipe Galvão Reis

Prof. Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos

Prof. Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins



**Janeiro de 2013**



Copyright, 2012, Fábio Emanuel Gil Velhinho, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador Prof. Doutor Rui Fernando Martins pela disponibilidade, ajuda e sugestões dadas e à família e amigos pelo apoio fornecido.



## RESUMO

O estudo da resistência à fadiga de estruturas soldadas é um assunto complexo, que depende de vários factores, nomeadamente: da geometria do cordão de soldadura resultante, do processo de soldadura utilizado na produção da ligação soldada, do tipo de ligação soldada, das tensões residuais resultantes do processo de soldadura e das zonas afectadas pelo calor de soldadura, só para nomear alguns dos factores de que depende a resistência à fadiga de uma ligação soldada.

Desta forma, a obtenção dos resultados experimentais de vida à fadiga (Curvas S-N) de ligações soldadas é muito importante, de modo a que se possa constituir uma base de dados para consulta dos projectistas. Estes resultados experimentais são obtidos através de ensaios à fadiga, realizados em provetes normalizados e são obtidos, regra geral, à temperatura ambiente.

Na presente tese procurou determinar-se a vida à fadiga (Curvas S-N), a 350°C, de uma ligação soldada em T, sem transferência de carga, fabricada num aço inoxidável austenítico, de alta resistência, recentemente desenvolvido (Cr-Mn) e passível de ser utilizado em condutas de evacuação de gases de combustão.

Tenho sido feito um ataque químico às superfícies a observar, foram realizados ensaios de dureza para caracterizar a zona fundida, a zona afectada pelo calor e a zona do metal de base do material.

A caracterização geométrica dos cordões de soldadura dos vários provetes a ensaiar foi realizada com a ajuda de uma máquina de medição de coordenadas X-Y e os dados coligidos foram aproveitados para fazer a modelação pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) dos vários provetes a ensaiar. O factor de concentração de tensões e a tensão crítica estrutural (hot spot) foram determinadas.

Alguns resultados de vida à fadiga são apresentados na tese.





## ABSTRACT

The study of the fatigue resistance of welded structures is a complex subject that depends on various factors, such as: the geometry of the weld bead, the detail category, the residual stresses induced by the weld process, the mechanical properties of the heat affected zone, just to mention some factors that the fatigue resistance of a welded joint depends.

Therefore, experimental fatigue data (S-N curves) of welded joints is very important to obtain, so that fatigue databases can be built in order to aid fatigue design of welded structures. This experimental data is usually obtained from fatigue tests, at room temperature, using standard specimens.

In this thesis, fatigue tests (S-N Curves) of a non-load carrying T-welded joint composed by a high-strength austenitic stainless steel, recently developed (Cr-Mn) and likely to be used in exhaust systems, were carried out at 350°C.

The specimens were chemically etched and hardness tests were performed either in the fusion zone, in the heat affected zone and in the base metal, in order to characterise each region.

The geometrical characterisation of the welded beads was performed using a X-Y coordinate measuring machine and data obtained was used to carry out Finite Element Analyses (FEA) of different specimens. Stress concentration factors and critical structural stresses (hot spot) were determined.

Some fatigue life results are presented in this thesis.



# ÍNDICE DE MATÉRIAS

1. INTRODUÇÃO E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	21
1.1 Introdução .....	3
1.2 Organização da dissertação .....	5
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	7
2.1 – Estruturas soldadas .....	9
2.1.1 <i>Material não homogêneo</i> .....	9
2.1.2 <i>Tensões residuais de soldadura</i> .....	10
2.1.3 <i>Características geométricas</i> .....	10
2.2 – Abordagem da tensão nominal (abordagem global) – <i>Nominal stress approach</i> 11	
2.2.1 <i>Recomendações do IIW [2] para a abordagem da tensão nominal</i> .....	11
2.2.2 <i>Abordagem da tensão nominal segundo D. Radaj [3]</i> .....	17
2.2.3 <i>Abordagem da tensão nominal segundo T. Bruder [10]</i> .....	18
2.3 – Abordagem da tensão no entalhe (Abordagem local) – <i>Notch stress approach</i> 19	
2.3.1 <i>Recomendações do IIW [2] para abordagem da tensão no entalhe</i> .....	19
2.3.2 <i>Abordagem da tensão no entalhe segundo D.Radaj [3]</i> .....	21
2.3.3 <i>Abordagem da tensão no entalhe segundo Olivier [6] [14]</i> .....	22
2.3.4 <i>Abordagem da tensão no entalhe segundo T. Bruder [10]</i> .....	23
2.3.5 <i>Abordagem da tensão no entalhe segundo Heuler e Seeger [15]</i> .....	24
2.4 – Abordagem da tensão crítica/estrutural no ponto crítico (abordagem intermédia) – – <i>Hot Spot Stress Approach or Structural Stress Approach</i> .....	25
2.4.1 <i>Recomendações do IIW [2] para a abordagem da tensão estrutural</i> .....	25
2.4.2 <i>Abordagem da tensão estrutural segundo Dijkstra [18] e Gurney [5]</i> .....	30
2.4.3 <i>Abordagem da tensão estrutural segundo T. Bruder [10]</i> .....	31
2.4.4 <i>Outras investigações da abordagem da tensão estrutural</i> .....	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....	35
3.1- Metodologia .....	37
3.2- Provetes retirados da ligação soldada em T sob estudo .....	39
3.2.1 <i>Procedimento para a determinação da geometria dos provetes</i> .....	39
3.2.2 <i>Polimento dos provetes e ataque químico</i> .....	41
3.2.3 <i>Ensaio de Dureza</i> .....	43
3.3 Materiais do provete e principais propriedades mecânicas e físicas .....	46
3.4 Análise estrutural, pelo Método dos Elementos Finitos, do detalhe estrutural catalogado (provetes de referência) .....	47

3.4.1	<i>FAT do detalhe catalogado</i> .....	48
3.4.2	<i>Determinação do Factor de Concentração de Tensões do detalhe catalogado</i> .....	50
3.5	Análise por meio do Método dos Elementos Finitos dos provetes ensaiados...	51
3.5.1	<i>Determinação da Tensão Principal Máxima</i> .....	51
3.5.2	<i>Cálculo da Classe de Fadiga (FAT) dos provetes</i> .....	53
3.6	Ensaaios experimentais à fadiga .....	54
4.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	57
4.1	Análise e resultados da determinação da geometria dos provetes .....	59
4.2	Observação das superfícies atacadas quimicamente e análise e discussão dos resultados .....	62
4.3	Resultados experimentais dos Ensaaios de Dureza .....	64
4.4	Resultados Experimentais dos Ensaaios de Fadiga .....	66
5	CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHO FUTURO.....	77
6	ANEXOS .....	81
A.	Coordenadas dos provetes através da mesa de coordenadas.....	83
B.	Coordenadas da zona sem penetração dos provetes .....	95
C.	Características particulares dos provetes.....	99
D.	Geometria da zona sem penetração dos provetes .....	101
E.	Indentações individuais dos ensaios de dureza .....	103
F.	Análise por meio de métodos finitos dos provetes catalogados e ensaiados..	105
	Bibliografia .....	107

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1- Zona de soldadura de ligações soldadas em T adaptada de [1].....	4
Figura 1.2- Exemplos de abordagens para determinação da resistência à fadiga (adaptada de [3]) .....	5
Figura 1.3- Organização da dissertação.....	6
Figura 2.1- Tensão nominal num componente tipo viga (adaptado de [7]).....	12
Figura 2.2- Exemplo de efeitos macro-geométricos e/ou de entalhes [7] .....	12
Figura 2.3- Tensão nominal modificada perto de cargas concentradas [7] .....	13
Figura 2.4- Desalinhamento axial e angular [7].....	13
Figura 2.5- Curvas S-N de resistência à fadiga aplicáveis a vários detalhes estruturais fabricados em aço: $m=3$ , gama de tensão nominal normal (adaptada de [8]) .....	15
Figura 2.6- Curvas S-N de resistência à fadiga para tensão de corte (aço) (adaptada de [8]) .....	15
Figura 2.7- Abordagem da tensão nominal para analisar a resistência à fadiga e vida de serviço de componentes não-soldados adaptado de [3] .....	18
Figura 2.8- Factores de concentração de tensão efectiva no entalhe (adaptado de [8]) .....	20
Figura 2.9- Abordagem da tensão no entalhe para avaliação do limite de duração dos componentes estruturais soldados (adaptado de [3]).....	22
Figura 2.10- Abordagem da tensão no entalhe para analisar o limite de duração de ligações soldadas (adaptado de [6] [14]).....	23
Figura 2.11- Abordagem da extensão no entalhe para análise da resistência à fadiga e vida de serviço (adaptado de [15]) .....	25
Figura 2.12- Definição de tensão estrutural [16] .....	26
Figura 2.13- Exemplo de ligação tubular (adaptado de [16]) .....	27
Figura 2.14- Localizações dos extensómetros de placas [16] .....	28
Figura 2.15- Localização dos extensómetros em estruturas tubulares (adaptado de [16]).....	29
Figura 2.16- Abordagem de tensão estrutural para análise da resistência à fadiga de componentes estruturais soldados (adaptado de [18] [5]).....	31
Figura 3.1- Macrografias de uma secção transversal da ligação soldada estudada: ligação soldada em T, sem transferência de carga, com penetração parcial, de chapas com espessura de 3mm. Aços inoxidáveis austeníticos: AISI 316L (cutelo) e Cr-Mn (chapa) .....	38
Figura 3.2- Fenda do pé do cordão de soldadura [21] .....	38
Figura 3.3- Placa com provetes .....	39
Figura 3.4- Placa com provetes (Vista Lat.).....	39
Figura 3.5- Mesa de coordenadas.....	39
Figura 3.6- Mesa de coordenadas 2.....	39
Figura 3.7- Câmara do equipamento óptico.....	40
Figura 3.8- Ecrã + registo de posição (MAXTASCAN).....	40
Figura 3.9- Provette sob a mesa de coordenadas .....	41
Figura 3.10- Pontos analisados no MAXTASCAN (vista de topo e vista lateral) .....	41

Figura 3.11- Provete 10 (usado para o polimento) .....	42
Figura 3.12- Polideira com lixas e com panos .....	42
Figura 3.13- Rebarbadora a alisar a zona arredondada do provete 10.....	43
Figura 3.14- Máquina para determinação de macro-durezas da marca Mitutoyo .....	45
Figura 3.15- Zonas das indentações individuais de cordões de canto.....	45
Figura 3.16- Parâmetros dos ensaios de dureza (botões à esquerda para definição da lente, tempo e unidade de dureza. Botão da direita para definição da massa.....	45
Figura 3.17- Provete a ser indentado.....	45
Figura 3.18- Microscópio da máquina de dureza .....	46
Figura 3.19- Leitor da máquina de durezas com indicação do comprimento das diagonais e o valor da dureza (HV) .....	46
Figura 3.20- Curvas S-N de resistência à fadiga para $m=3$ , tensão normal (aço) (adaptado de [8]) .....	47
Figura 3.21- Detalhe catalogado mais aproximado .....	48
Figura 3.22- Provetes catalogados.....	49
Figura 3.23- Malha de elementos finitos e condições de fronteira aplicadas nos provetes .....	49
Figura 3.24- Análise da tensão principal máxima .....	49
Figura 3.25- Apoios fixos do provete e pressão aplicada .....	51
Figura 3.26-Malha de elementos finitos do provete.....	51
Figura 3.27-Distribuição da tensão principal máxima do provete1 ensaiado .....	51
Figura 3.28- Análise da tensão principal máxima do provete 1 ensaiado (cordão) .....	52
Figura 3.29- Curvas de fadiga estimadas.....	54
Figura 3.30- Máquina rotativa.....	55
Figura 3.31- Ponteira fabricada em material abrasivo e leque de lixas .....	55
Figura 3.32- Provete 1 na máquina de ensaios.....	56
Figura 4.1- Dimensões finais do provete 1.....	61
Figura 4.2- Modelação 3D da zona sem penetração do provete 1 .....	61
Figura 4.3-Modelação 3D da zona não soldada do provete 2 .....	61
Figura 4.4- Ligações em T sem transferência de carga: espessura da chapa principal (T1), espessura da chapa do cutelo (T2) e da distância entre os pés dos cordões de soldadura (L) (adaptado de [21]).....	62
Figura 4.5- Macrografia do cordão esquerdo do provete 10 .....	63
Figura 4.6- Macrografia do cordão direito do provete 10.....	63
Figura 4.7- Dimensões da área resistente de ambos os lados da peça.....	66
Figura 4.8- Aspecto do controlador da máquina no decorrer do ensaio à fadiga do provete teste e provete 1 a ser ensaiado .....	67
Figura 4.9- Fractura do provete 2 .....	68
Figura 4.10- Fractura da cavilha .....	68
Figura 4.11- Curva S-N estimada para o provete 1 .....	69
Figura 4.12- Curva SN estimada para o provete 2 .....	70
Figura 4.13- Curva SN estimada para o provete 3 .....	71
Figura 4.14- Curva SN estimada para o provete 4 .....	72
Figura 4.15- Curva SN estimada para o provete 5 .....	73
Figura 4.16- Curva SN estimada para o provete 6 .....	74

Figura 4.17- Curva SN experimental .....	74
Figura 4.18- Curva SN experimental para o provete 4.....	75
Figura 4.19- Curva SN experimental.....	75
Figura 6.1- Ponto 1 do provete 1 .....	83
Figura 6.2- Ampliação do provete 2 .....	84
Figura 6.3- Ampliação dos pontos C e D do provete 2.....	84
Figura 6.4- Zona central do provete 3.....	87
Figura 6.5- Ampliação do ponto 4 do provete 4.....	87
Figura 6.6- Cutelo do provete 6.....	93
Figura 6.7- Zona sem penetração do provete 1 .....	95
Figura 6.8- Zona sem penetração do provete 2 .....	95
Figura 6.9- Zona sem penetração do provete 3 .....	96
Figura 6.10- Zona sem penetração do provete 4 .....	96
Figura 6.11- Zona sem penetração do provete 5.....	97
Figura 6.12- Zona sem penetração do provete 6.....	97
Figura 6.13- Cordão de soldadura do provete 6.....	99
Figura 6.14- Observação das imperfeições devido ao jacto de água no provete 1 .....	99
Figura 6.15- Observação da zona circular do provete 1 com imperfeições.....	99
Figura 6.16- Imperfeição no cutelo do provete 5.....	99
Figura 6.17- Modelação em SolidWorks da zona sem penetração do provete 1 .....	101
Figura 6.18- Modelação em SolidWorks da zona sem penetração do provete 2 .....	101
Figura 6.19- Modelação em SolidWorks da zona sem penetração do provete 3 .....	101
Figura 6.20- Modelação em SolidWorks da zona sem penetração do provete 4 .....	101
Figura 6.21- Modelagem em SolidWorks da zona sem penetração do provete 5 .....	102
Figura 6.22- Modelagem em SolidWorks da zona sem penetração do provete 6 .....	102
Figura 6.23- Indentações 1, 2, 5, 9, 10, 11, 13.....	103
Figura 6.24- Valores de dureza das indentações 1, 2, 5, 9, 10, 11, 13 .....	103
Figura 6.25- Indentações 3, 4, 7, 9, 10, 11, 13.....	103
Figura 6.26- Valores de dureza das indentações 3, 4, 7, 9, 10, 11, 13 .....	103
Figura 6.27- Análise da tensão principal máxima do provete catalogado 2.....	105
Figura 6.28- Análise da tensão principal máxima do provete catalogado 3.....	105
Figura 6.29- Análise da tensão principal máxima do provete catalogado 4.....	105
Figura 6.30- Análise da tensão principal máxima do provete catalogado 5.....	105
Figura 6.31- Análise da tensão principal máxima do provete 6 .....	105
Figura 6.32- Análise da tensão principal máxima do provete 2 ensaiado (cordão) .....	106
Figura 6.33- Análise da tensão principal máxima do provete 3 ensaiado (cordão) .....	106
Figura 6.34- Análise da tensão principal máxima do provete 4 ensaiado (cordão) .....	106
Figura 6.35- Análise da tensão principal máxima do provete 5 ensaiado (cordão) .....	106
Figura 6.36- Análise das tensões de Von Mises do provete 6 real (cordão) .....	106





## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1- Valores de resistência à fadiga para detalhes estruturais em aço analisados com base em tensões normais (adaptada de [8]).....	17
Tabela 2.2- Vantagens, desvantagens e requisitos da abordagem da tensão nominal segundo [10].....	18
Tabela 2.3- Resistência à fadiga efectiva do entalhe para o aço (adaptado de [9]).....	21
Tabela 2.4- Vantagens, desvantagens e requisitos da abordagem da tensão no entalhe segundo [10].....	24
Tabela 2.5- Resistência à fadiga da tensão estrutural (adaptado de [17]) .....	29
Tabela 2.6- Vantagens, Desvantagens e Requisitos da Abordagem da tensão estrutural .....	32
Tabela 3.1- Materiais e propriedades mecânicas e físicas dos provetes.....	46
Tabela 3.2- Tensão principal máxima estrutural e no entalhe de cada provete (como catalogado).....	50
Tabela 3.3- Factor de concentração de tensões .....	50
Tabela 3.4- Factor de concentração de tensões de cada provete (ensaiado) .....	52
Tabela 3.5- Factor de concentração de tensões .....	52
Tabela 3.6- Classe de fadiga real .....	53
Tabela 3.7- Parâmetros genéricos dos ensaios à fadiga.....	56
Tabela 4.1- Coordenadas do provete 1 da vista de topo do provete .....	59
Tabela 4.2- Coordenadas do provete 1 da vista lateral do provete .....	60
Tabela 4.3- Parâmetros T1, T2 e L medidos nas ligações soldadas em T sem transferência de carga .....	62
Tabela 4.4- Ensaios de dureza de teste .....	64
Tabela 4.5- Ensaios de dureza individuais.....	65
Tabela 4.6- Dimensões e Parâmetros iniciais de cada provete.....	66
Tabela 4.7- Níveis de tensão utilizados para os ensaios de fadiga .....	67
Tabela 4.8- Valores experimentais .....	67
Tabela 4.9- Valores de fadiga estimados e experimentais do provete 1 .....	69
Tabela 4.10 - Valores de fadiga estimados e experimentais do provete 2 .....	70
Tabela 4.11- Valores de fadiga estimados e experimentais do provete 3 .....	70
Tabela 4.12- Valores de fadiga estimados e experimentais do provete 4 .....	71
Tabela 4.13-Valores de fadiga estimados e experimentais do provete 5.....	72
Tabela 4.14- Valores de fadiga estimados e experimentais do provete 6 .....	73
Tabela 6.1- Coordenadas do provete 2 da vista de topo do provete .....	83
Tabela 6.2- Coordenadas do provete 2 da vista lateral do provete .....	84
Tabela 6.3- Coordenadas do provete 3 da vista de topo do provete .....	86
Tabela 6.4- Coordenadas do provete 3 da vista lateral do provete .....	87
Tabela 6.5- Coordenadas do provete 4 da vista de topo do provete .....	88
Tabela 6.6- Coordenadas do provete 4 da vista lateral do provete .....	89
Tabela 6.7- Coordenadas do provete 5 da vista de topo do provete .....	90
Tabela 6.8- Coordenadas do provete 5 da vista lateral do provete .....	91
Tabela 6.9- Coordenadas do provete 6 da vista de topo do provete .....	92
Tabela 6.10- Coordenadas do provete 6 da vista lateral do provete .....	93
Tabela 6.11- Pontos da zona sem penetração do provete 1.....	95

Tabela 6.12- Pontos da zona sem penetração do provete 2.....	95
Tabela 6.13- Pontos da ligação não soldada do provete 3 .....	96
Tabela 6.14- Pontos da zona sem penetração do provete 4.....	96
Tabela 6.15- Pontos da zona sem penetração do provete 5.....	97
Tabela 6.16- Pontos da zona sem penetração do provete 6.....	97

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$\rho_f$  – raio fictício do entalhe

$\sigma_{nlp}$  – tensão não linear

$\sigma_{est}$  – tensão estrutural

$\sigma_{mem}$  – tensão de membrana

$\sigma_{flex}$  – tensão de flexão

$\sigma_{nom}$  – tensão nominal

$\sigma_{est,ref}$  – tensão estrutural do entalhe de referência

$\sigma_{est,avaliada}$  – tensão estrutural do entalhe que se quer avaliar

$\Delta M$  – Gama de momento aplicado

$\Delta F$  – Gama de força aplicada

$\Delta \bar{\sigma}_{max}$  - Valor máximo da gama de tensão

$\Delta M_E$  – Gama de momento externo aplicado

$\Delta F_E$  – Gama de força externa aplicada

$\Delta S$  – Gama de tensão

$\Delta S_m$  – Gama de tensão média

$\Delta \sigma_e$  – Gama de tensão efectiva

$\sigma_m$  – Tensão média

$\Delta \sigma_1$  – Gama de tensão principal I

$\Delta \sigma_2$  – Gama de tensão principal II

$\Delta \bar{\sigma}_{max,e}$  - Gama de tensão efectiva máxima

$\rho$  – Raio de curvatura do entalhe

$\Delta \varepsilon$  – Gama de extensão

$\Delta \bar{F}$  – Gama de força média

$a^*$  - Parâmetro do material (efeito de micro-suporte)

BEM – *Boundary Element Method* - Método dos Elementos de Fronteira

Curvas de resistência à fadiga: gama de tensão em função do número de ciclos.

$da/dN$  – Velocidade de propagação de uma fenda

FAT – classe de resistência à fadiga

$FAT_{avaliada}$  – classe de resistência à fadiga do entalhe que se quer avaliar

$FAT_{ref}$  – classe de referência de resistência à fadiga do entalhe

$f_y$  – Tensão Limite de Elasticidade

IIW – *International Institute of Welding* - Instituto Internacional de Soldadura

$k_{m,off}$  - Factor adicional de aumento de tensão segundo a abordagem da tensão nominal

$k_t$  – factor de concentração de tensões

$K_m$  – Factor de concentração de tensão em ligações soldadas

m – declive das curvas de resistência à fadiga

MEF – Método dos Elementos Finitos

NDT – *Non-destructive testing* (ensaio de inspecção não destrutivos)

$N_E$  – Limite de duração efectiva

$\bar{N}$  – Número de ciclos médio

P – Parâmetro de dano

$P_{SWT}$  – Parâmetro de dano segundo Smith, Watson e Topper

r – raio do pé do cordão de soldadura para ligações em T

t – espessura da placa

$\gamma_r$  – Factor de redução

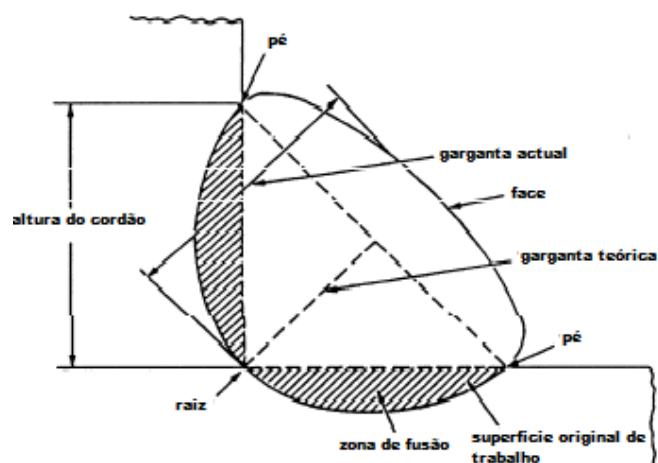
## **1. INTRODUÇÃO E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**



## **1.1 Introdução**

Um dos desafios que se coloca a quem projecta estruturas soldadas consiste em definir detalhe estrutural apropriado, assim como o processo de soldadura e a geometria do cordão de soldadura adequados para maximizar a resistência à fadiga do detalhe estrutural. De facto, o conhecimento da geometria da soldadura só é possível após a mesma estar efectuada, i.e., a geometria final da soldadura depende de muitos factores que influenciam o ângulo de soldadura, o raio de soldadura (figura 1.1).

Neste estudo tentar-se-á prever a influência da soldadura na vida à fadiga de uma ligação soldada em T, de um aço inoxidável austenítico AISI 316L (cutelo) soldado com um aço inoxidável austenítico de alta resistência, Cr-Mn, utilizado na chapa principal da ligação soldada sem transferência de carga.



**Figura 1.1- Zona de soldadura de ligações soldadas em T adaptada de [1]**

O estudo apresentado na dissertação tem como base as recomendações do IIW [2] no que diz respeito ao projecto de ligações e componentes soldados sujeitos à fadiga. No entanto, as recomendações dadas pelo IIW [2] são recomendações gerais e é necessário particularizá-las para o caso em estudo.

Denomina-se por fadiga o processo de mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre num material sujeito a uma determinada tensão cíclica, em um ponto ou em vários pontos, que pode resultar numa fenda ou numa falha estrutural quando sujeita a um número suficiente de número de ciclos de carregamento [3]. A fadiga de materiais (metal base não soldado) é um processo extremamente complexo e mesmo nos dias de hoje, ainda não está totalmente compreendida. Os danos no material começam na estrutura cristalina e tornam-se visíveis numa fase mais tardia através da deformação plástica, da formação de micro-fendas, da coalescência de micro-fendas e da propagação de fendas principais. Este processo é complexo devido a numerosos factores e o comportamento à fadiga de diferentes materiais tem sido investigado extensivamente.

A fadiga de materiais soldados é um processo ainda mais complexo. De facto, o processo de soldadura afecta os materiais através das fases resultantes do aquecimento e arrefecimento e, também, através da adição do material de adição, resultando em materiais não-homogéneos. Para além do exposto, a geometria do cordão de soldadura resultante da operação de soldadura varia e está longe de ser isenta de defeitos de soldadura, podendo conter poros, inclusões, faltas de penetração, etc. A geometria do perfil de soldadura cria concentração de tensões locais elevadas, com parâmetros muito grandes de variação de geometria. As tensões residuais e as distorções devido ao processo de soldadura também afectam o comportamento à fadiga.



Como consequência, a fractura devido à fadiga aparece em estruturas soldadas, mais concretamente na zona de soldadura do que propriamente no material base, mesmo que o material base contenha entalhes e aberturas. Por esta razão, a análise à fadiga é de grande interesse para todas as estruturas soldadas sujeitas a carregamento cíclico, como navios, pontes, veículos, etc, ie., estruturas que estejam sujeitas à aplicação de cargas dinâmicas, de tipo aleatório ou de amplitude constante.

Para fazer a análise de um componente sujeito à fadiga é necessário seguir uma abordagem global ou local. Estas abordagens, que serão descritas noutra secção do presente documento, têm como grande objectivo fazer o projecto de componentes estruturais baseando-se em valores de tensões e extensões. Estes valores poderão causar danos no componente, que se iniciam com a nucleação de um defeito e posterior propagação de uma fenda, podendo resultar, eventualmente, na fractura de todo o componente. Tendo em vista, a complexidade do assunto, não é estranho verificar as diferentes possibilidades de estudos para fazer a avaliação de um componente à fadiga (figura 1.2).

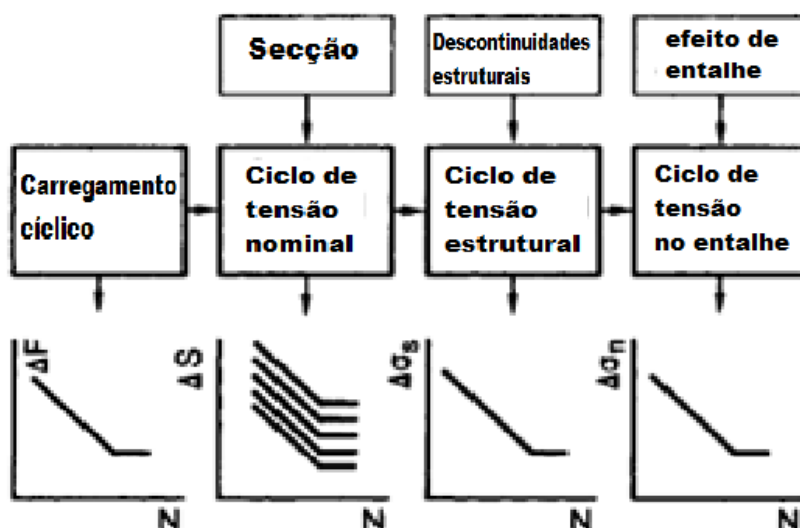


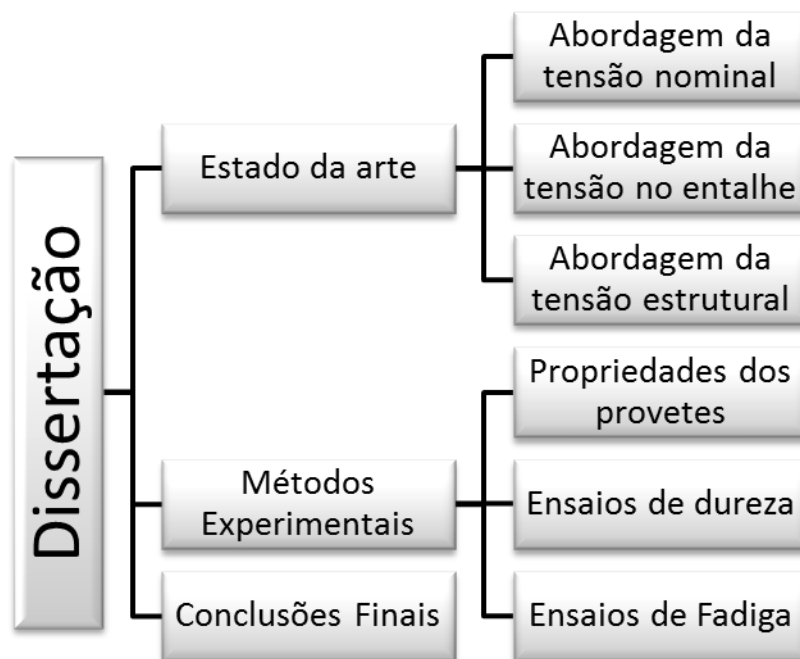
Figura 1.2- Exemplos de abordagens para determinação da resistência à fadiga (adaptada de [3])

De todas as abordagens existentes escolheram-se as três que mais se adequavam ao estudo realizado como podemos observar na figura 1.2, nomeadamente: uma abordagem considerando a tensão nominal, a tensão no entalhe ou a tensão crítica ou estrutural (*hot spot*).

## 1.2 Organização da dissertação

No capítulo I faz-se uma breve introdução ao tema em estudo e uma explicação da organização da dissertação. No capítulo II estão expostos os fundamentos teóricos da

dissertação, que resultaram de uma pesquisa bibliográfica realizada sobre o tema em análise. Estes fundamentos têm como base três abordagens principais, nomeadamente: global, local e intermédia (figura 1.3). Para cada abordagem, mostraram-se as recomendações do Instituto Internacional de Soldadura [2] e o desenvolvimento da abordagem segundo diferentes autores [4] [5] [6]. No capítulo III encontram-se descritos os métodos experimentais utilizados para obtenção de características e propriedades do material base e das ligações soldadas estudadas. No capítulo IV voltam a aparecer métodos experimentais mas, neste caso, todos os métodos experimentais dizem respeito à análise à fadiga do conjunto. O capítulo V refere-se aos resultados e às conclusões da dissertação.



**Figura 1.3- Organização da dissertação**

## **2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**



## **2.1 – Estruturas soldadas**

Algumas das características específicas das estruturas soldadas, que as diferem das estruturas não soldadas, são abordadas neste subcapítulo. Estas características vão afectar o comportamento da vida à fadiga do material.

### **2.1.1 *Material não homogéneo***

As ligações soldadas caracterizam-se pela existência de material não homogéneo na zona soldada. O material de adição é semelhante ao do material base, mas, geralmente, incorpora elementos de liga, de modo a poder alcançar-se uma elevada qualidade de fabrico e ser possível obter uma ligação soldada com propriedades mecânicas semelhantes ou superiores às do material de base. O material de adição funde-se e mistura-se com o material

base na zona da soldadura em que os materiais estão no estado líquido, enquanto alguns elementos da liga são queimados e outros evaporados. Pode haver também deposição de elementos provenientes da atmosfera ambiente. Se não existir libertação de gases na zona fundida e se o material for susceptível à existência de fendas, podem ocorrer micro-poros, que podem ser causa de nucleação de micro-fendas. As inclusões podem ser diferentes quanto ao tipo e ao número [3]. Tais irregularidades podem ocorrer especialmente na área do pé ou da raiz de soldadura [3]. Concomitantemente, a zona termicamente afectada é caracterizada por diferentes micro-estruturas, de acordo com os ciclos térmicos experimentados no processo de soldadura. Estas micro-estruturas apresentam diferentes tamanhos de grão, diferentes valores de dureza, resultando em diferentes valores de tensão de cedência, do factor de intensidade de tensão de início de fenda e de diferentes parâmetros de velocidade de propagação de fenda.

Além do material não homogéneo da ligação soldada, outros defeitos típicos da soldadura podem acontecer, como por exemplo: falta de fusão ou falta de penetração [3].

### ***2.1.2 Tensões residuais de soldadura***

A soldadura é geralmente realizada através da fundição do material das partes a serem ligadas e pela fundição do material de adição, por concentração de fonte de calor. O subsequente arrefecimento rápido produz tensões residuais de soldadura por via da deformação térmica. Estas tensões podem alcançar o valor da tensão de cedência na área de soldadura e decrescem, abruptamente, na zona vizinha. As tensões residuais de soldadura podem eventualmente ser reduzidas pelo carregamento cíclico, ou modificadas favoravelmente, se a ductilidade do material for adequadamente elevada e se o carregamento cíclico for suficientemente severo [3]. A vida à fadiga e o valor limite de resistência à fadiga, obtidos para a condição de grande número de ciclos, podem ser modificados devido ao efeito das tensões residuais. Este é o caso em que tensões residuais de valor elevado e de tracção reduzem a vida à fadiga da ligação soldadas, mas também o caso em que as tensões residuais de compressão, produzidas devido ao tratamento pós-soldadura, como por exemplo: martelagem e grenalhagem, são favoráveis ao aumento da vida à fadiga das ligações soldadas.

### ***2.1.3 Características geométricas***

A análise da resistência à fadiga e a determinação da tensão limite da vida à fadiga das ligações soldadas, feitas com base nos parâmetros de tensão e extensão local, é difícil devido

à dispersão dos parâmetros geométricos. O raio de curvatura do pé do cordão de soldadura, ou na raiz de soldadura, e o ângulo de tangência do reforço da soldadura, perto do pé de soldadura, têm, regra geral, um elevado grau de dispersão. O mesmo acontece no caso da existência de bordos queimados e para o caso do diâmetro do ponto de soldadura, quando se trata, como no último caso, de soldaduras feita por resistência. Estes dados geométricos do entalhe de ligações soldadas dependem do tipo de processo utilizado e dos parâmetros do processo de soldadura, dos materiais soldados, da espessura da placa e da margem de tolerância quando são posicionados os componentes estruturais a serem ligados, podendo haver algum desalinhamento. A raiz de soldadura ou a zona sem penetração podem ser visíveis após o corte transversal e o polimento da secção resultante.

## **2.2 – Abordagem da tensão nominal (abordagem global) –** *Nominal stress approach*

A análise da resistência à fadiga, do ponto de vista da abordagem global, faz-se a partir do conhecimento das tensões nominais induzidas por forças e/ou momentos que estão a actuar nas ligações soldadas, resultando numa distribuição de tensão constante ou linear aplicada nas secções. As abordagens globais usam normalmente valores limites de carregamento ou de tensão nominal, que estão relacionados com fenómenos globais. A abordagem global pode ser definida também como a ‘abordagem da tensão nominal’ [3].

### **2.2.1 Recomendações do IIW [2] para a abordagem da tensão nominal**

A tensão nominal é a tensão calculada numa área considerada, que está suficientemente afastada da ligação soldada/soldadura, e que não tem em conta os efeitos de aumento da tensão local da ligação soldada (figura 2.1). No entanto, pode incluir os efeitos de aumento de tensão da forma macro-geométrica do componente/entalhe na vizinhança da ligação soldada. Neste tipo de abordagem é assumido o comportamento linear elástico da estrutura.

A tensão nominal pode variar na secção considerada de forma linear (figura 2.1), num componente de tipo viga. Neste caso, a tensão nominal e a sua variação ao longo da secção resistente pode ser calculada usando a teoria simples de vigas, num local suficientemente afastado da zona de soldadura.

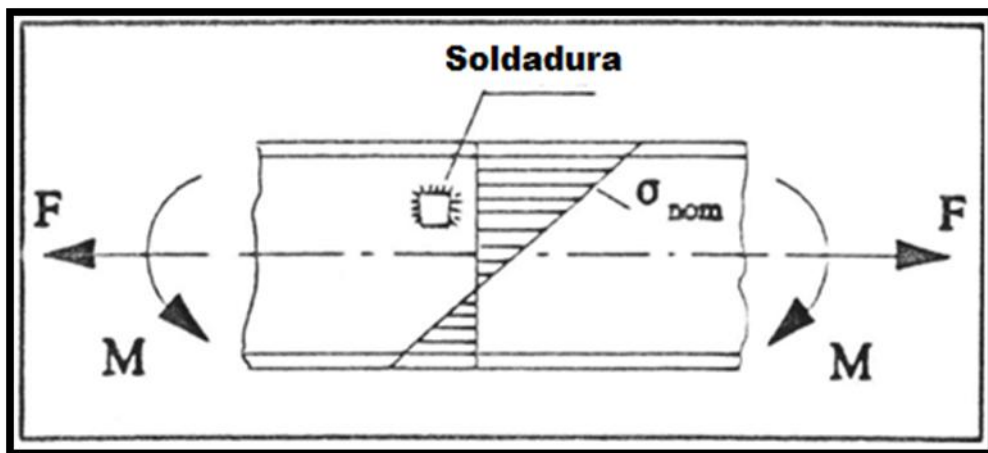


Figura 2.1- Tensão nominal num componente tipo viga (adaptado de [7])

Os efeitos das características macro-geométricas do componente e entalhes (figura 2.2), assim como a distribuição de tensões na vizinhança de cargas concentradas, devem ser incluídos no cálculo da tensão nominal. Consequentemente, os efeitos macro-geométricos podem causar uma redistribuição significativa das tensões através da secção. Alguns efeitos semelhantes ocorrem na vizinhança de cargas concentradas ou na vizinhança de forças de reacção, podendo ocorrer uma flexão significativa na casca (figura 2.3), assim como uma distorção da secção resistente do componente.

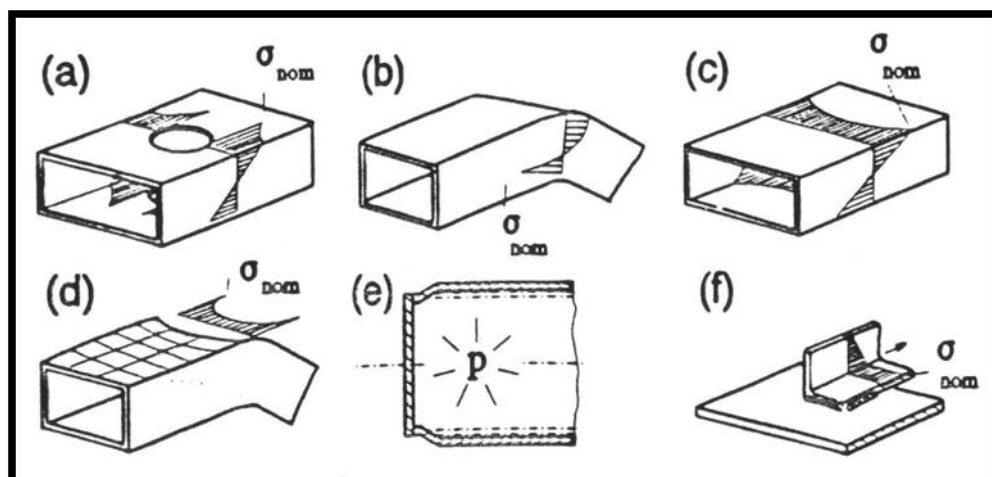


Figura 2.2- Exemplo de efeitos macro-geométricos e/ou de entalhes [7]



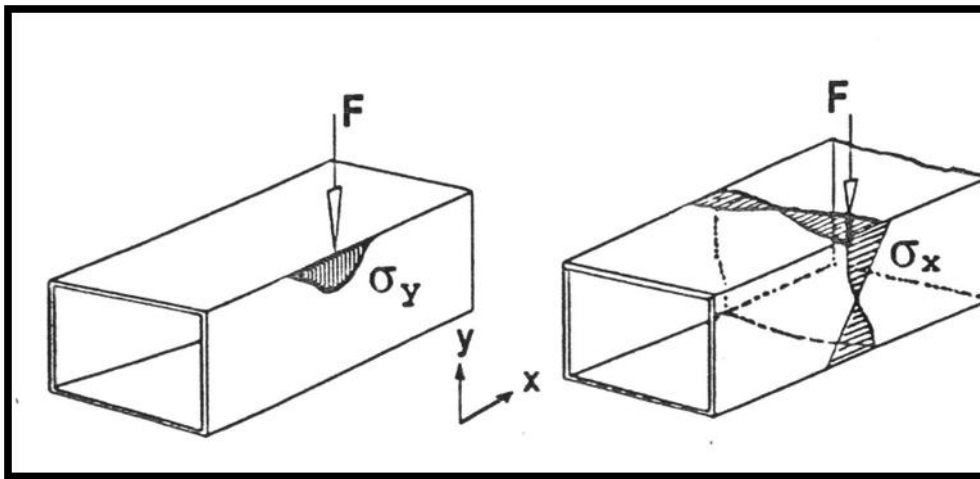


Figura 2.3- Tensão nominal modificada perto de cargas concentradas [7]

A flexão secundária originada pelo desalinhamento axial ou angular (figura 2.4), de natureza voluntária ou involuntária, necessita ser considerada no cálculo da vida à fadiga de um detalhe estrutural soldado se o desalinhamento for significativo e se exceder o valor para o qual está abrangido pela curva S-N correspondente ao detalhe estrutural [2]. A inclusão do desalinhamento é feita por aplicação de um factor adicional de aumento de tensão  $k_{m,off}$  [7] considerando-se uma imperfeição na soldadura ou dividindo a tensão de resistência à fadiga pelo factor de concentração de tensão.

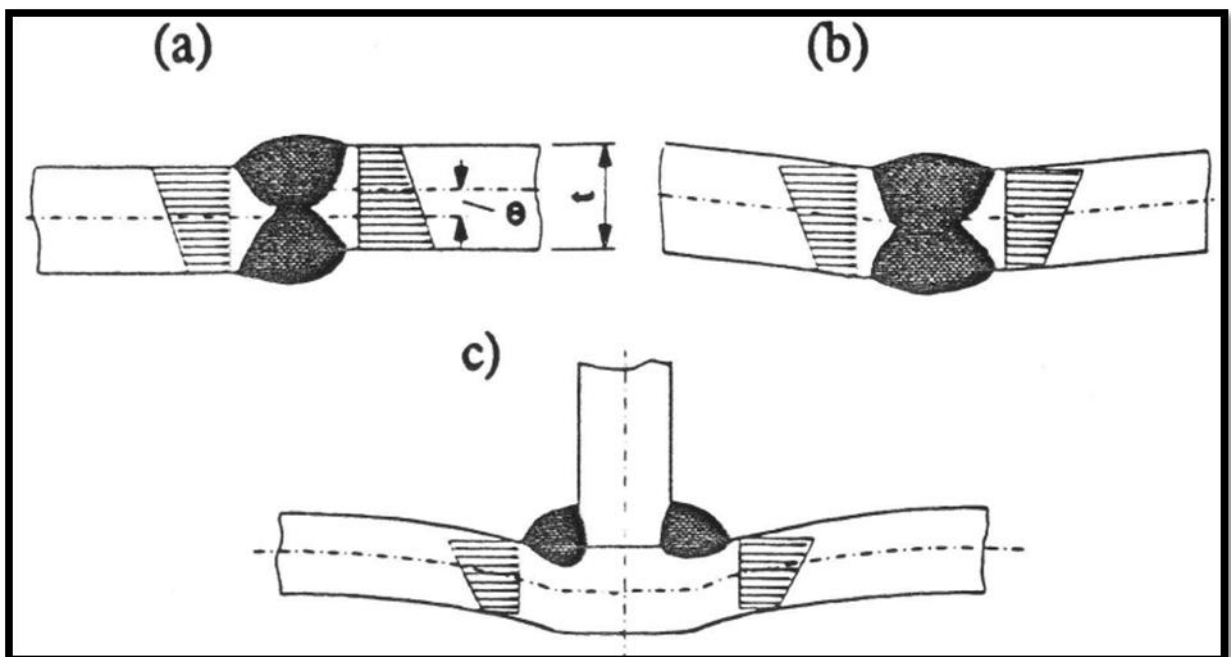


Figura 2.4- Desalinhamento axial e angular [7]

No caso de se estar a lidar com componentes simples, a tensão nominal pode ser determinada usando teorias elementares de mecânica estrutural, com base no comportamento linear elástico do material. Noutros casos, o método dos elementos finitos (MEF) poderá ser utilizado. Isto acontece quando, por exemplo, se analisam estruturas hiperestáticas, ou quando os componentes estruturais sob estudo têm incorporados neles descontinuidades macro-geométricas para as quais não há solução analítica disponível. Quando se usa o MEF é necessário ter especial cuidado em assegurar que todos os efeitos de aumento de tensão decorrentes do cordão de soldadura são excluídos quando se calcula a tensão nominal modificada.

- **Medição da Tensão Nominal através de extensómetros**

Conforme foi referido anteriormente, as curvas S-N de detalhes estruturais catalogados [7] (Figura 2.5) tem como base as tensões nominais aplicadas nos detalhes estruturais. No entanto, não tem em conta a concentração de tensão devida à geometria do cordão de soldadura da ligação soldada. Devido a este facto, a tensão nominal também pode ser medida, por exemplo, através de extensómetros, que devem ser colocados sobre o detalhe estrutural, fora do campo de concentração de tensões locais originados pela ligação soldada.

- **Resistência à fadiga de detalhes catalogados**

A análise da vida à fadiga de detalhes estruturais classificados e de ligações soldadas tem como base a variação da tensão nominal. A gama da tensão nominal, definida como a diferença entre o valor máximo e mínimo da tensão nominal induzida num detalhe estrutural, deve encontrar-se dentro dos limites das propriedades elásticas do material. Com efeito, a gama dos valores de projecto da variação de tensão não deve exceder  $1,5 \times f_y$  [7] para as tensões normais nominais e  $1,5 \times (f_y / \sqrt{3})$  [7] para as tensões de corte nominais, representando “ $f_y$ ” o valor da tensão de cedência do material.

Na maioria dos casos, os detalhes estruturais são analisados com base na gama de tensão principal máxima induzida na secção onde a fenda à fadiga é mais provável de nuclear e de propagar. No entanto, as recomendações também são fornecidas para analisar os detalhes de carregamento de corte, com base na gama de tensão de corte. Diferentes curvas S-N são providenciadas para variados detalhes estruturais, tendo em consideração diversas gamas de tensão normal ou de corte, como é demonstrado nas figuras 2.5 e 2.6, respectivamente.

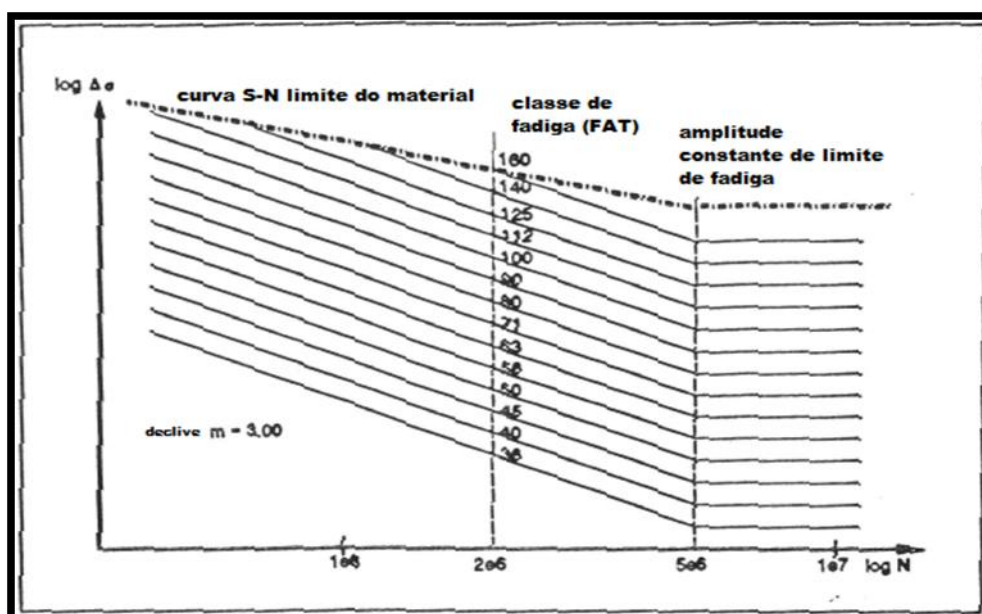


Figura 2.5- Curvas S-N de resistência à fadiga aplicáveis a vários detalhes estruturais fabricados em aço:  $m=3$ , gama de tensão nominal normal (adaptada de [8])

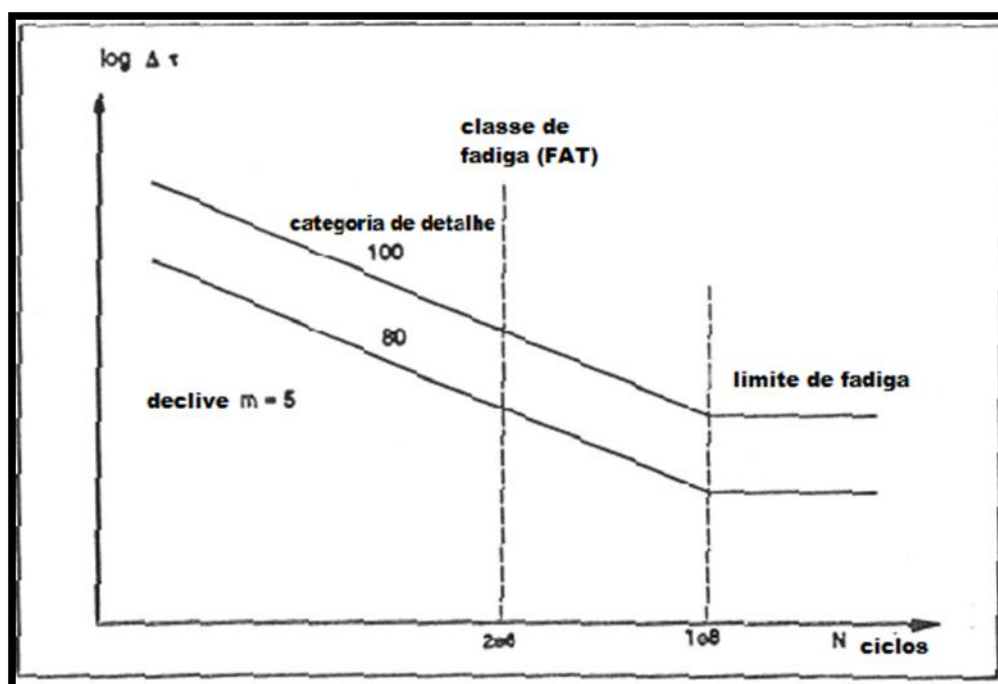


Figura 2.6- Curvas S-N de resistência à fadiga para tensão de corte (aço) (adaptada de [8])

É necessária especial atenção para assegurar que o tipo de tensão utilizado (normal ou de corte) e o detalhe estrutural de que se quer efectuar a análise da resistência à fadiga são os

mesmos que os dados pelas tabelas de detalhes estruturais classificados (Tabela 2.1). Concomitantemente, a existência de concentração de tensões macro-geométricas não está abrangida pelo detalhe estrutural, por exemplo, grandes recortes na vizinhança da ligação soldada têm que ser tidos em conta pelo uso da análise de tensão pelo MEF ou de factores de concentração de tensões apropriados.

As curvas de resistência à fadiga de ligações soldadas, obtidas através de ensaios experimentais por aplicação de tensões normais, incluem os seguintes efeitos:

- concentração de tensões estruturais devido ao detalhe estrutural
- concentração de tensões locais devidas à geometria de soldadura
- imperfeições de soldadura consistente com os padrões de fabrico normais
- direcção de tensão
- tensões residuais de soldadura
- condições metalúrgicas
- processo de soldadura (fusão, soldadura)
- procedimento de inspecção não destrutivo (NDT) e tratamento pós-soldadura, se especificado com o objectivo de aceitar ou não os provetes para ensaio.

Além disso, dentro dos limites impostos pelas considerações de resistência estática, as curvas de resistência à fadiga de ligações soldadas são independentes da resistência de tracção do material. Cada curva de resistência à fadiga é identificada pela resistência à fadiga característica do detalhe quando se atinge os 2 milhões de ciclos [8]. Esse valor denomina-se por classe de fadiga (FAT) (figuras 2.5 e 2.6).

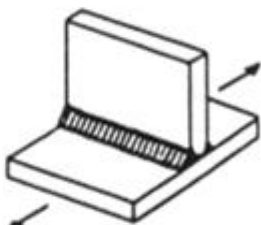
Em geral, o declive das curvas de resistência à fadiga, obtidas para detalhes avaliados com base em tensões normais (figura 2.5), é igual a  $m=3.00$  [8]. e o valor da tensão limite de fadiga é obtida para  $5 \times 10^6$  ciclos (figura 2.5). O declive das curvas de resistência à fadiga para os detalhes analisados com base em tensões de corte (figura 2.6) é  $m=5.00$  [8], mas neste caso o limite de fadiga corresponde a um valor de  $10^8$  ciclos [8].

As descrições dos detalhes estruturais só contêm informação parcial acerca do tamanho, da geometria e da qualidade da soldadura. Os dados apontam para uma qualidade padrão que é dada em códigos e procedimentos de soldadura padrão. Para qualidades acima ou abaixo da qualidade padrão, irão ser necessárias algumas modificações.

Todas as curvas S-N de detalhes estruturais são limitadas pela curva S-N do material (figura 2.5), que pode variar devido às diferentes resistências dos vários materiais ensaiados.

O valor de resistência à fadiga dado na tabela 2.1, relativo a um detalhe de soldadura semelhante ao estudado na presente tese, refere-se a ligações soldadas em aço, na condição de 'como soldado', a não ser que seja mencionado o contrário. Os efeitos das tensões residuais devidos à soldadura e ao desalinhamento axial até  $\frac{e}{t} = 0.1$  [8] estão também incluídos. O NDT indica que a soldadura tem que ser inspeccionada usando os métodos apropriados para assegurar que não contém defeitos de fabrico significativos.

**Tabela 2.1- Valores de resistência à fadiga para detalhes estruturais em aço analisados com base em tensões normais (adaptada de [8])**

No.	Detalhe estrutural (aço estrutural)	Descrição	FAT
500	<b>Ligações sem transferência de carga</b>		
511		<p>Ligação transversal sem transferência de carga. Não é tão espesso quanto a placa principal.</p> <p>Soldadura de canto, "como soldado"</p> <p>Menos espesso que a placa principal</p>	<p>80</p> <p>71</p>

### **2.2.2 Abordagem da tensão nominal segundo D. Radaj [3]**

Segundo D. Radaj, que estudou estruturas não soldadas, a curva S-N incorpora a influência do material, da geometria (incluindo os efeitos do entalhe e o efeito do tamanho) e da superfície (inclusive as tensões residuais e o acabamento superficial) e a vida de serviço resulta da aplicação de blocos de tensão nominal, resultantes da contagem de ciclos, na curva S-N (figura 2.7). O cálculo do dano acumulado é feito de acordo com a regra linear de acumulação de dano de Miner [9]. O espectro da tensão nominal provém do espectro de carregamento tendo em conta a secção transversal de suporte e o tipo de carregamento. O cálculo da vida de serviço é geralmente realizado em relação à fractura final, mas também pode ser realizado em relação à iniciação da fractura. Os efeitos da sequência de carregamento continuam a não ser considerados. Estes efeitos podem ser tidos em consideração se a função carregamento-tempo estiver disponível, ou se as contribuições de dano forem tidas em conta de ciclo para ciclo na sequência certa.

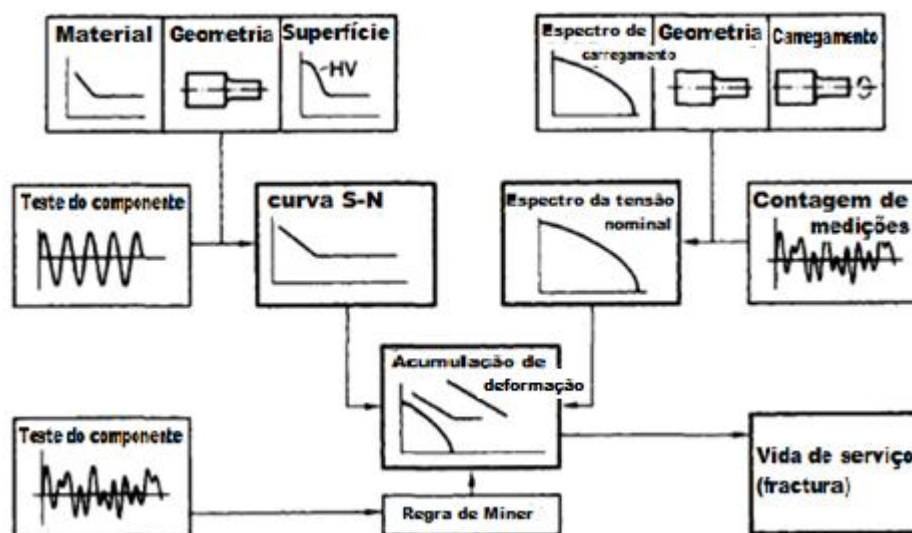


Figura 2.7- Abordagem da tensão nominal para analisar a resistência à fadiga e vida de serviço de componentes não-soldados adaptado de [3]

### 2.2.3 Abordagem da tensão nominal segundo T. Bruder [10]

T. Bruder [10] listou, em síntese, um conjunto de vantagens, desvantagens e requisitos da abordagem segundo a tensão nominal (Tabela 2.2).

Tabela 2.2- Vantagens, desvantagens e requisitos da abordagem da tensão nominal segundo [10]

Vantagens	Desvantagens	Requisitos
<ul style="list-style-type: none"> <li>- A curva S-N, caracterizada pela classe de fadiga (FAT), tem em conta, tipicamente, a localização da fractura para o detalhe de soldadura com interesse.</li> <li>- É de fácil aplicação, se o detalhe de soldadura estiver incluído no catálogo e se a tensão nominal puder ser</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O catálogo de detalhes fornece as classes de fadiga (FAT) somente para um número limitado de detalhes de soldadura;</li> <li>- As imperfeições, tais como o desalinhamento da linha central e o desalinhamento angular são abrangidos até um certo grau na resistência à fadiga dada pela classe FAT. O IIW não fornece</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requer uma definição clara da tensão nominal</li> </ul>

determinada.	informações sobre modificações em caso de melhoramento da qualidade de soldadura.	
--------------	---	--

## 2.3 – Abordagem da tensão no entalhe (Abordagem local) – *Notch stress approach*

A análise da resistência à fadiga é denominada por abordagem local se a mesma tem em conta parâmetros de tensão e extensão locais aplicados no local de nucleação e propagação de fendas. A iniciação de fenda está interligada com a abordagem da tensão no entalhe, que tem como base as tensões e extensões no entalhe. A propagação da fenda e a fractura final são descritas pela abordagem da mecânica da fractura. Esta última abordagem não vai ser abordada neste estudo.

### 2.3.1 Recomendações do IIW [2] para abordagem da tensão no entalhe

A tensão efectiva é a tensão total induzida na raiz do entalhe, assumindo-se o comportamento elastoplástico do material [11]. Para ter em conta a natureza estocástica e a dispersão dos parâmetros da geometria da soldadura, assim como o comportamento não linear do material junto ao pé/raiz do entalhe, o raio de curvatura real do pé/raiz do cordão de soldadura é substituído por um real fictício [11]. Para os aços estruturais, um raio de curvatura fictício do entalhe da soldadura,  $r$ , de 1 mm (figura 2.8) foi estudado e obtiveram-se resultados consistentes [11]. Para fazer a análise à fadiga, a tensão efectiva do entalhe é utilizada na curva de resistência à fadiga. O método é limitado a placas com espessura,  $t$ , igual ou superior a 5 mm [8]; para espessuras de parede inferiores a 5 mm, o método não foi ainda suficientemente verificado [11].

A aplicação do método é restrita a ligações soldadas transversas, onde a fractura ocorre no pé do cordão de soldadura ou na raiz da soldadura [11]. A fractura quando ocorre na superfície rugosa do material (para lá da zona de soldadura) não é abrangida por este método, assim como no caso em que a tensão aplicada é paralela ao cordão de soldadura.

- **Cálculo da tensão efectiva no entalhe**

As tensões efectivas no entalhe ou os factores de concentração de tensão podem ser calculados por fórmulas paramétricas, ou podem ser retirados de diagramas, ou calculadas pelo MEF, ou pelo BEM [12]. O possível desalinhamento tem que ser considerado nestes cálculos.

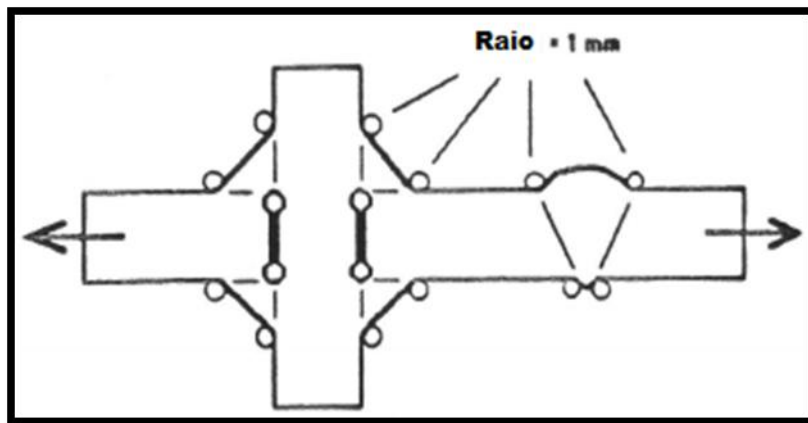


Figura 2.8- Factores de concentração de tensão efectiva no entalhe (adaptado de [8])

- **Resistência à fadiga utilizando a tensão efectiva no entalhe**

Um exemplo da classe de resistência à fadiga associada à tensão efectiva no entalhe é dada na tabela 2.3, à semelhança do que aconteceu na abordagem da tensão nominal. O valor da classe de fadiga (FAT) refere-se à condição de 'como soldado' e o efeito das tensões residuais de soldadura está incluído nesse valor, ao contrário de um possível desalinhamento que não se encontra incluído.



**Tabela 2.3- Resistência à fadiga efectiva do entalhe para o aço (adaptado de [9])**

<b>Nº</b>	<b>Qualidade do entalhe de soldadura</b>	<b>Descrição</b>	<b>FAT</b>
<b>1</b>	<b>Raio efectivo do entalhe = 1mm substituindo o pé de soldadura e a raiz de soldadura do entalhe</b>	<b>Entalhe "como soldado", qualidade normal de soldadura</b> <b>m=3</b>	<b>225</b>

### **2.3.2 Abordagem da tensão no entalhe segundo D.Radaj [3]**

Segundo D. Radaj [3], a abordagem da tensão no entalhe é aplicável tanto a ligações soldadas com cordão de soldadura contínuo como a ligações soldadas ponto a ponto, sendo utilizado o efeito de entalhe de Neuber [13] [1].

O procedimento é demonstrado na figura 2.9, que representa uma ligação soldada sujeita a um momento torsor. Em primeiro lugar, as tensões estruturais e as forças internas existentes nas placas, ou nos perfis/componentes, e na zona onde se encontram os entalhes da soldadura, são determinadas, desprezando o efeito do entalhe. Isto pode ser feito usando fórmulas paramétricas, o MEF ou extensómetros.

Em segundo lugar, as tensões estruturais e as forças internas são tratadas como forças externas para o modelo seccionado da ligação soldada, com arredondamento fictício no entalhe que representa a ligação soldada, com o objectivo de determinar o factor elástico de concentração de tensões à fadiga do entalhe aplicando o BEM ou o MEF e determinando as tensões e extensões elasto-plásticas locais, tendo em consideração a geometria do entalhe, a tensão aplicada, a resposta da tensão-deformação do material e relacionando-as com as tensões e extensões nominais através da Regra de Neuber.

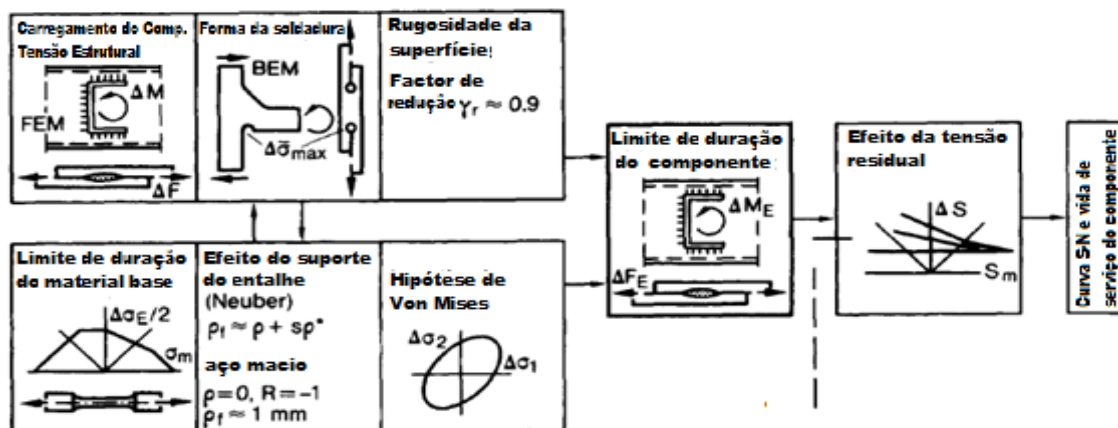


Figura 2.9- Abordagem da tensão no entalhe para avaliação do limite de duração dos componentes estruturais soldados (adaptado de [3])

Apesar do facto da abordagem ter sido proposta para qualquer raio de curvatura do entalhe, a mesma tem sido aplicada utilizando a pior consideração possível, em qual o raio real do entalhe,  $\rho$ , é introduzido como zero e o raio fictício do entalhe resulta em  $\rho_f \approx 1\text{mm}$  [3], no caso de ligações soldadas em aço macio (Figura 2.9).

A resistência à fadiga tem que ter em conta o factor de concentração de tensões à fadiga, mas também o facto de o entalhe ter um acabamento superficial específico, que está associado a uma rugosidade média da superfície. Portanto, a correcção relativa ao acabamento superficial tem de ser introduzida, sendo aproximadamente igual a 0.9 [3] quando se trata de aços com baixa resistência (Figura 2.9) (baixa dureza e resistência à tracção).

O estado de tensão multiaxial na raiz do entalhe é tido em conta pela hipótese de Von Mises enquanto os materiais dúcteis forem considerados e os carregamentos estiverem em fase. A tensão estática média deve ser tida em conta com base no diagrama de Haigh.

A abordagem da tensão no entalhe é especialmente adequada para determinar a influência dos parâmetros de geometrias locais das ligações soldadas na resistência à fadiga. Estes parâmetros compreendem o raio de curvatura do entalhe, o ângulo de tangência no pé do cordão de soldadura, a profundidade de penetração e a espessura da placa.

### 2.3.3 Abordagem da tensão no entalhe segundo Olivier [6] [14]

A abordagem da tensão no entalhe segundo Olivier [6] [14] trata-se de uma modificação da abordagem da tensão no entalhe segundo Radaj [3]. A motivação da investigação de Olivier [6] [14] foi a incerteza de como classificar vigas de secção ôca, com soldaduras longitudinais. Um largo número de ligações soldadas em T e com cordões de

soldadura de canto foram estudados. As fracturas devido à fadiga tiveram início no pé do cordão de soldadura ou na raiz do cordão de soldadura (Figura 2.10).

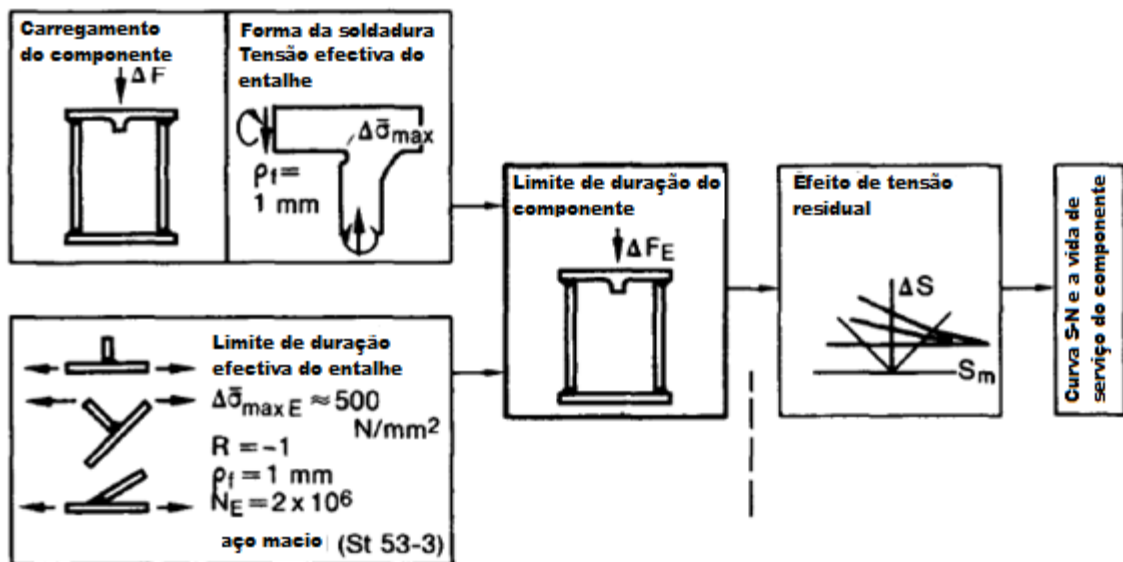


Figura 2.10- Abordagem da tensão no entalhe para analisar o limite de duração de ligações soldadas (adaptado de [6] [14])

O limite de duração à fadiga de um componente estrutural soldado provém das tensões induzidas no entalhe da estrutura soldada, que é comparado mais tarde com o limite de duração à fadiga de tensão no entalhe nos espécimes testados (determinadas para um raio fictício do entalhe de 1 mm).

#### 2.3.4 Abordagem da tensão no entalhe segundo T. Bruder [10]

T. Bruder [10] resumiu as vantagens, desvantagens e requisitos da abordagem da tensão no entalhe. Esse resumo vai ser apresentado mais uma vez sob a forma de tabela (tabela 2.4).

**Tabela 2.4- Vantagens, desvantagens e requisitos da abordagem da tensão no entalhe segundo [10]**

Vantagens	Desvantagens	Requisitos
<ul style="list-style-type: none"> <li>- É aplicável à maior parte dos detalhes de soldadura com fractura a partir do pé do cordão da soldadura ou da raiz de soldadura.</li> <li>- As recomendações de modelação devem ser consideradas no que diz respeito à análise das tensões e extensões elasto-plásticas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O estado de tensão na vizinhança da soldadura não é considerado no conceito. Uma consideração separada tem que ser dada para os efeitos do tamanho.</li> <li>- O cálculo da tensão no entalhe é mais complexo do que o conceito da tensão nominal. A sua aplicação pode ser simplificada usando um <i>software</i> que permita fazer uma análise com base no MEF, combinada com a análise das tensões internas do entalhe com base nos modelos ou factores de concentração de tensões publicados para detalhes de soldadura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Quando aplicado o conceito, é essencial ser possível reproduzir o estado de tensão no detalhe de soldadura usando o raio de referência usado.</li> <li>- A abordagem pode ser feita com base na tensão principal máxima ou nas tensões de Von Mises.</li> </ul>

### **2.3.5 Abordagem da tensão no entalhe segundo Heuler e Seeger [15]**

O procedimento usado por Heuler e Seeger [15] para realizar a análise da vida à fadiga de estruturas com cordões de soldadura de canto, em ambos os lados, tem em conta a curva P-N (figura 2.11), sendo P o parâmetro de dano. Esta curva constitui a base para se obter a curva F-N, que é comparada com a curva da vida de serviço do componente estrutural. As propriedades mecânicas cíclicas do material base, da zona afectada pelo calor e do material de adição são utilizados.

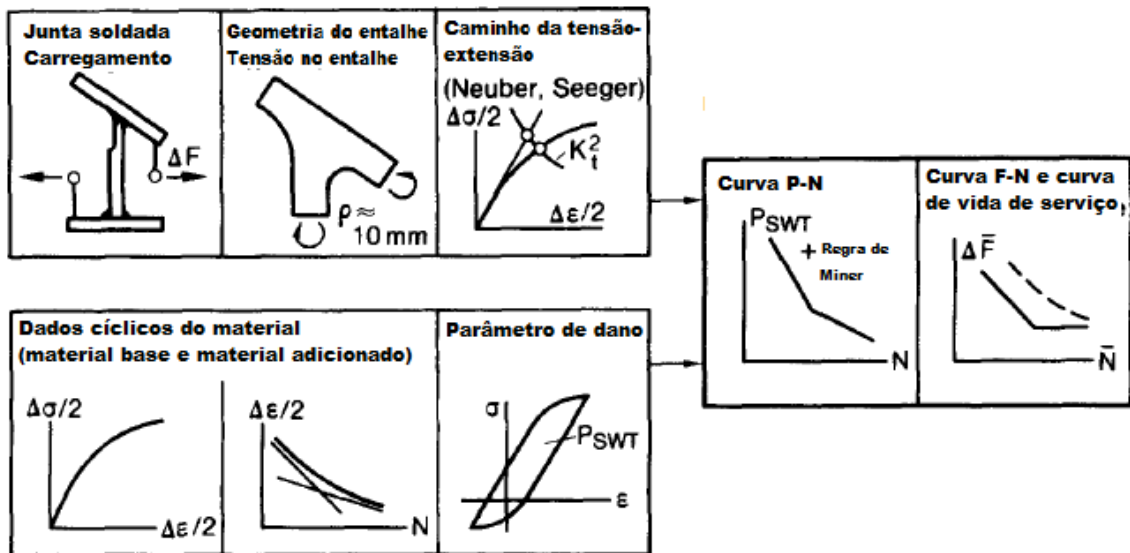


Figura 2.11- Abordagem da extensão no entalhe para análise da resistência à fadiga e vida de serviço (adaptado de [15])

## 2.4 – Abordagem da tensão crítica/estrutural no ponto crítico (abordagem intermédia) – – *Hot Spot Stress Approach or Structural Stress Approach*

Uma abordagem intermédia entre a versão global/nominal e a local é a abordagem da tensão crítica estrutural (*Hot spot stress ou Structural stress*) que enfatiza a tensão nominal e as tensões locais de compatibilidade geométrica, causadas pela macro-geometria, enquanto o efeito do entalhe introduzido pelo cordão de soldadura é suprimido.

### 2.4.1 Recomendações do IIW [2] para a abordagem da tensão estrutural

A tensão estrutural inclui todos os efeitos de aumento de tensão de um detalhe estrutural excluindo todas as concentrações devidas ao perfil do cordão de soldadura. Então, o aumento de tensão não linear causado pela presença do entalhe local, isto é, pelo cordão e pelo raio de curvatura do pé do cordão de soldadura, é excluído da tensão estrutural. A tensão estrutural depende dos parâmetros dimensionais globais dos componentes e dos parâmetros de carregamento na vizinhança da ligação soldada. Esses parâmetros são determinados na superfície do ponto do componente que se quer avaliar (figura 2.12).

As tensões estruturais  $\sigma_{est}$  são geralmente calculadas em placas e estruturas tubulares. Estas podem ser divididas em duas componentes de tensão, a tensão de membrana  $\sigma_{mem}$  e a tensão de flexão  $\sigma_{flex}$ . Devido à inclusão dos efeitos de aumento de tensão das descontinuidades estruturais elas são ligeiramente maiores do que as tensões nominais.

Para a análise à fadiga, a tensão estrutural tem de ser determinada na direcção crítica, no ponto crítico da ligação soldada (*hot spot*), onde a iniciação da fenda à fadiga é esperada (figura 2.12). Geralmente, os valores de tensão principal máxima são usados.

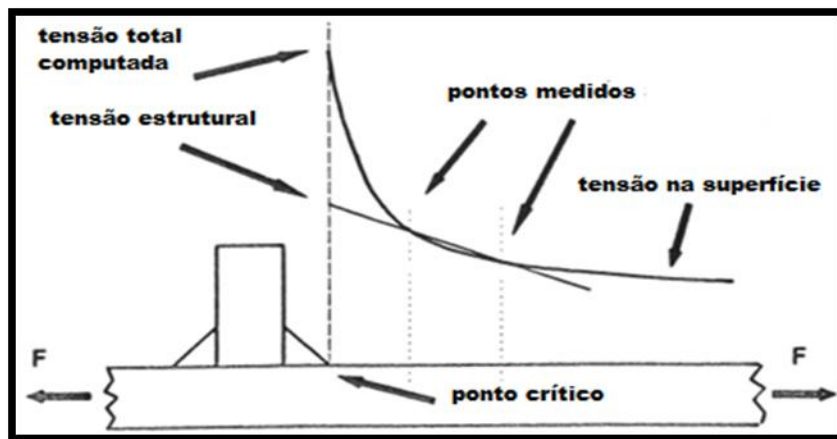


Figura 2.12- Definição de tensão estrutural [16]

A abordagem da tensão estrutural é recomendada para ligações soldadas onde não há uma clara definição da tensão nominal devido a efeitos estruturais complicados e onde a descontinuidade estrutural não é comparável com os detalhes estruturais catalogados.

- **Cálculo da Tensão Estrutural**

A análise de descontinuidades em detalhes estruturais para obtenção da tensão estrutural não é possível usando métodos analíticos. As fórmulas paramétricas estão raramente disponíveis. Assim, a análise segundo o MEF é mais usada. Neste caso, os valores da tensão principal máxima devem ser calculados.

Qualquer desalinhamento tem que ser tido em consideração e a malha dos elementos finitos tem que ser mais refinada na zona mais próxima do ponto crítico, para permitir que a tensão e o gradiente de tensão sejam comparados através de pontos de extrapolação, tal como é realizado quando a metodologia escolhida é a da medição com extensómetros.

Para muitas ligações soldadas, entre elas as secções circulares de tubos, (Figura 2.13), fórmulas paramétricas têm sido determinadas para o factor de concentração de tensões  $k_t$  em termos de tensão estrutural nos pontos críticos. Contudo, para ligações soldadas de estruturas tubulares complexas, o MEF tem de ser utilizado. A tensão estrutural é igual a:

$$\sigma_{est} = k_t \cdot \sigma_{nom} \quad [16] \text{ (Equação 2.1)}$$

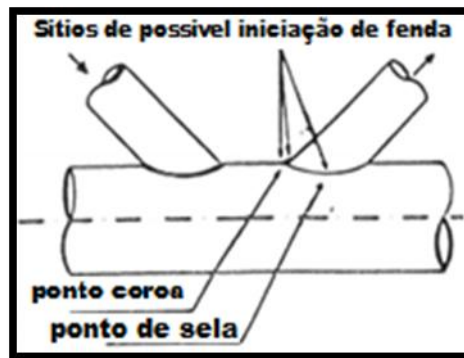


Figura 2.13- Exemplo de ligação tubular (adaptado de [16])

Onde  $\sigma_{nom}$  é a tensão nominal axial da membrana nos braços, calculada pela análise das tensões elementares.

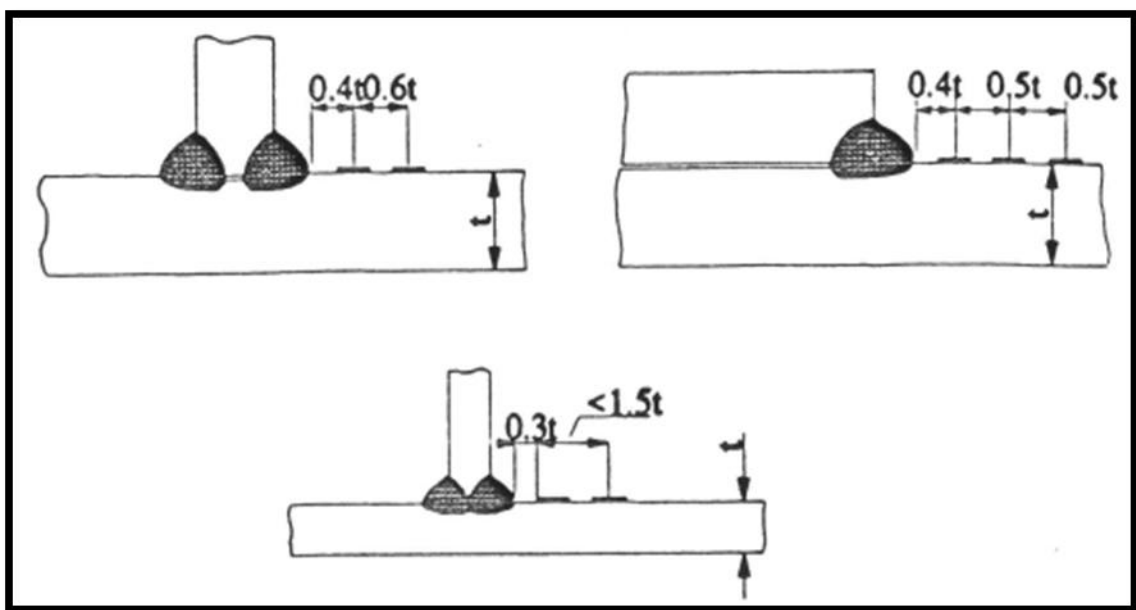
A tensão estrutural pode ser medida usando dois ou três extensómetros colados a distâncias específicas do pé de soldadura (figura 2.14). A posição do extensómetro mais próximo do cordão de soldadura é escolhida para evitar qualquer influência do entalhe devido à soldadura (pico de tensão não linear). A tensão estrutural no pé de soldadura é então obtida por extrapolação.

As medições foram feitas nos pontos críticos e estes podem ser encontrados por:

- a) medição de diferentes pontos
- b) investigações prévias
- c) analisando os resultados de uma análise anterior de MEF
- d) experiência de componentes existentes que fracturaram
- e) investigações foto-elásticas
- f) investigações termo-elásticas

A localização dos extensômetros deve resultar numa extrapolação razoável para o ponto crítico. O ponto central do primeiro extensômetro deve ser colocado a uma distância de  $0,4t$  [16] do pé do cordão de soldadura. O comprimento do extensômetro não deve exceder  $0,2t$  [16]. Se isto não for possível devido à espessura pequena da placa, a aresta frontal do extensômetro deve ser colocada a  $0,3t$  [16] do pé de soldadura. O procedimento de extrapolação seguinte e o número de extensômetros são recomendados:

- a) dois extensômetros e extrapolação linear nos casos de tensões de membrana.
- b) três extensômetros e extrapolação quadrática nos casos de tensões de flexão



**Figura 2.14- Localizações dos extensômetros de placas [16]**

A figura 2.14 mostra as posições dos extensômetros para tensões baixas de flexão devido a baixa rigidez (em cima à esquerda), para tensões altas de flexão devido a alta rigidez (em cima à direita e em baixo).

Para ligações tubulares, existem outras recomendações que permitem o uso da extrapolação linear usando dois extensômetros (figura 2.15).



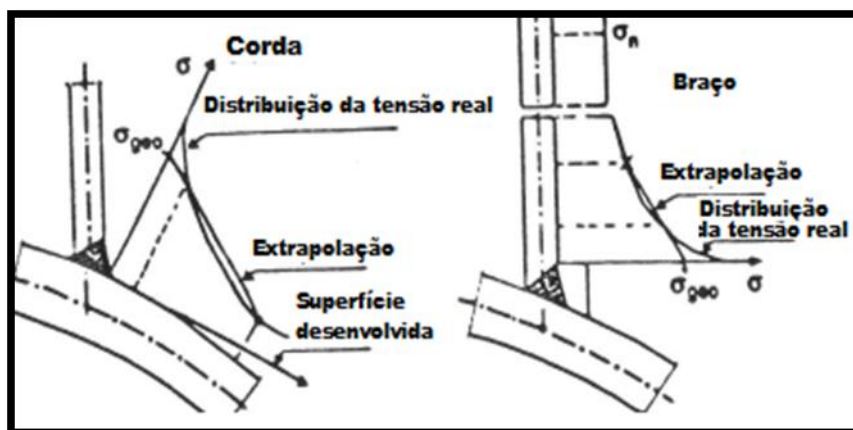


Figura 2.15- Localização dos extensómetros em estruturas tubulares (adaptado de [16])

Um exemplo de classe de fadiga de tensões estruturais é dada na tabela 2.5 para o caso de soldaduras feitas em estruturas em aço. Os valores de resistência referem-se à condição de “como soldado” a não ser que o contrário seja mencionado. Os efeitos das tensões residuais estão incluídos. O valor de projecto da gama de tensão estrutural não deve exceder  $2f_y$  [17].

Tabela 2.5- Resistência à fadiga da tensão estrutural (adaptado de [17])

Nº	Descrição	FAT
1	<b>Soldadura de topo, penetração total, com possível desalinhamento</b>	
2	<b>Soldadura de canto no pé, - pé “como soldado”</b> $m=3$	100
3	<b>Juntas cruciformes com possível desalinhamento, não abrange a determinação da tensão geométrica</b>	

As tabelas de resistência à fadiga de detalhes estruturais podem ser utilizadas. O detalhe de referência deve ser escolhido o mais semelhante possível ao detalhe a ser avaliado. Assim, o procedimento deve ser:

- a) Seleccionar um detalhe de referência com Classe de Fadiga conhecida, que seja o mais semelhante possível ao detalhe que se quer considerar, possuindo os parâmetros geométricos e de carregamento adequados;

- b) Identificar o tipo de tensão no qual a Classe de Fadiga é expressa, que normalmente é a tensão nominal;
- c) Fazer uma simulação numérica, utilizando o MEF, do detalhe de referência e do detalhe a ser avaliado com o mesmo tipo de malha e elementos finitos.
- d) Aplicar ao detalhe de referência e ao detalhe a ser avaliado a tensão identificada em b).
- e) Determinar a tensão estrutural ( $\sigma_{est,ref}$ ) no detalhe de referência e a tensão estrutural ( $\sigma_{est,avaliada}$ ) no detalhe a ser avaliado.
- f) A Classe de Fadiga para 2 milhões de ciclos do detalhe a avaliar ( $FAT_{avaliada}$ ) é então calculada a partir da Classe de Fadiga do detalhe de referência ( $FAT_{ref}$ ) por:

$$FAT_{avaliada} = \frac{\sigma_{est,ref}}{\sigma_{est,avaliada}} \cdot FAT_{ref} \quad [17] \text{ (Equação 2.2)}$$

#### 2.4.2 Abordagem da tensão estrutural segundo Dijkstra [18] e Gurney [5]

Podem ocorrer tensões bastante elevadas, a nível local, em treliças constituídas por barras de secção oca, por exemplo em ligações tubulares de aço. Essas tensões têm origem, principalmente, na flexão local do tubo devido aos efeitos de entalhe impostos. A resistência à fadiga de ligações tubulares pode ser determinada com base na concentração de tensões locais.

Segundo Dijkstra [18] e Gurney [5], a abordagem da tensão estrutural para ligações estruturais feitas de tubos de secção circular aponta para a determinação de tensões estruturais locais na casca do tubo, no ponto de iniciação de fenda, e, usando essa tensão como tensão nominal num provete de ligação soldada simples, como por exemplo, em ligações soldadas com cordões de canto.

O método descrito acima é limitado às seguintes condições: o ponto de iniciação de fenda tem que ser conhecido previamente (chamado ponto crítico que está sob carregamento cíclico), a fenda deve ser iniciada no pé do cordão de soldadura, isto é, não deve ser iniciada na raiz de soldadura, o carregamento transversal da soldadura deve predominar, a tensão estrutural deve ser separada da tensão no entalhe e, finalmente, o efeito de entalhe e a qualidade de soldadura na ligação tubular e no provete comparado deve ser aproximadamente o mesmo.

Os procedimentos para separar a tensão estrutural da tensão do entalhe são agora considerados com maior detalhe. Seguindo o procedimento proposto por Dijkstra [18] e Gurney [5], as tensões axiais na superfície do tubo são medidas a uma distância menor e a uma distância maior do pé de entalhe da soldadura, aplicando-se à posteriori uma extrapolação linear ao ponto de concentração de tensões no pé do cordão do entalhe. A posição exacta dos dois pontos onde se medem as tensões necessárias para a extrapolação dependerá do diâmetro e da espessura da parede do tubo, isto é, depende dos parâmetros geométricos que determinam o campo de tensões na ligação tubular quando modelado como uma estrutura de casca cilíndrica (as distâncias ao pé de soldadura do entalhe  $0,2\sqrt{rt}$  [5] e  $0,65\sqrt{rt}$  [5], por exemplo, com o diâmetro do tubo  $2r$  e a espessura da parede do tubo ( $t$ )). A abordagem da tensão estrutural combinada com o método de separação acima é incorporada nas regras de projecto para estruturas tubulares.

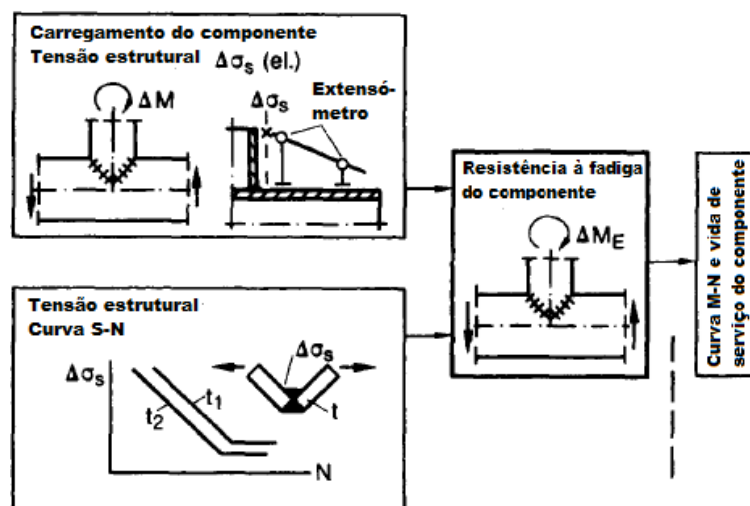


Figura 2.16- Abordagem de tensão estrutural para análise da resistência à fadiga de componentes estruturais soldados (adaptado de [18] [5])

#### 2.4.3 Abordagem da tensão estrutural segundo T. Bruder [10]

T. Bruder [10] realizou um resumo com as vantagens, desvantagens e requisitos da abordagem da tensão estrutural. Esse resumo vai ser apresentado de seguida sob a forma de tabela:

**Tabela 2.6- Vantagens, Desvantagens e Requisitos da Abordagem da tensão estrutural**

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>	<b>Requisitos</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Relaciona a tensão nominal com a tensão estrutural o que oferece uma análise mais local.</li> <li>- Considera o efeito da ligação soldada na peça sem ter em conta o efeito do entalhe.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- É necessário escolher pontos para a extrapolação das tensões estruturais. Existem muitos pontos e localizações para uma determinada estrutura. Vários métodos de extrapolação têm sido descritos, que, quando determinados por MEF também dependem do tamanho da malha escolhida.</li> <li>- Nas recomendações do IIW [2], é somente considerada a fractura no pé do cordão de soldadura. Hoje em dia, ainda não há recomendações para o uso de tensões estruturais para analisar ligações em relação à fractura na raiz de soldadura. Além disso, os valores de FAT são dados somente para tensões actuando na direcção perpendicular ao cordão de soldadura. Dados experimentais para soldaduras sob torção não são conhecidos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requer uma extrapolação das tensões para o detalhe em questão de modo a encontrar a tensão do ponto crítico.</li> <li>- O desalinhamento antecipado da ligação tem de ser considerado no modelo MEF ou é tido em conta usando um factor de aumento <math>K_m</math>.</li> <li>- Devido ao procedimento de extrapolação, esta abordagem requer um esforço computacional maior quando comparado com a abordagem da tensão nominal.</li> </ul>

#### **2.4.4 Outras investigações da abordagem da tensão estrutural**

As abordagens dos autores dos subcapítulos anteriores não foram os únicos a desenvolver pontos de vista particulares sobre a abordagem estrutural. M. Vormwald [19] apresentou uma abordagem estrutural comparando-a com a abordagem da mecânica da fractura. Outra investigação muito importante foi a de G. Savaidis [20]. O autor apresenta uma

avaliação à fadiga de estruturas soldadas utilizando o método dos elementos finitos segundo a abordagem estrutural.



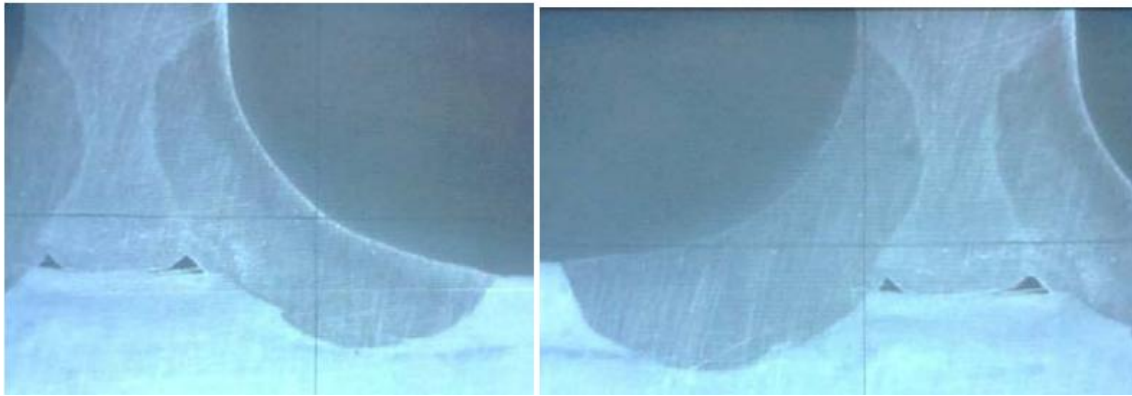
### **3. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS**





### **3.1- Metodologia**

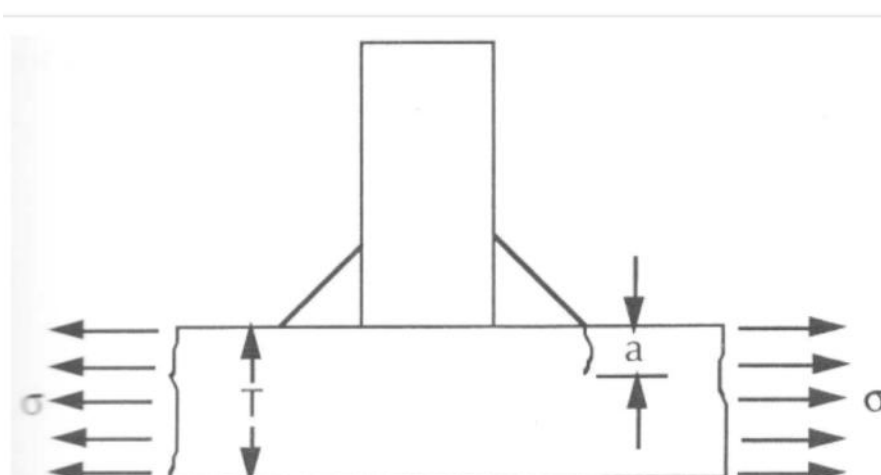
No capítulo 2 descreveram-se três abordagens distintas para fazer a análise da vida à fadiga de ligações soldadas. Tendo em conta a ligação soldada em estudo (ligação soldada em T, sem transferência de carga, com penetração parcial (Figura 3.1)), a abordagem segundo a tensão no entalhe foi excluída, uma vez que, segundo o IIW [2], a análise da vida à fadiga segundo esta abordagem só é possível para ligações soldadas compostas por chapas com uma espessura superior a 5 mm. No caso da ligação soldada em T em estudo, esta é formada por chapas com aproximadamente 3 mm de espessura, não sendo possível a utilização da abordagem local para prever a vida à fadiga da ligação soldada.



**Figura 3.1- Macrografias de uma secção transversal da ligação soldada estudada: ligação soldada em T, sem transferência de carga, com penetração parcial, de chapas com espessura de 3mm. Aços inoxidáveis austeníticos: AISI 316L (cutelo) e Cr-Mn (chapa)**

Quanto à possibilidade de utilização de uma das duas restantes abordagens, optou-se pela utilização da abordagem da tensão estrutural (*hot spot*). Por um lado, esta abordagem abrange, também, de certa maneira, a abordagem da tensão nominal e por outro fornece uma análise da vida à fadiga adequada à peça em questão. Tendo em consideração as dimensões das chapas e dos cordões de soldadura da ligação soldada sob estudo, assumiu-se que a fenda se iniciará no pé do cordão de soldadura (figura 3.2).

Apesar de estar catalogado [8] um detalhe estrutural semelhante à ligação soldada em estudo (Tabela 2.1), é aconselhável que se use o procedimento do subcapítulo 2.4.1, que consiste em analisar o detalhe estrutural através do MEF e/ou através de fórmulas paramétricas.



**Figura 3.2- Fenda do pé do cordão de soldadura [21]**

## 3.2- Provete retirados da ligação soldada em T sob estudo

### 3.2.1 Procedimento para a determinação da geometria dos provetes

De modo a determinar com precisão a geometria dos provetes a ensaiar à fadiga (figuras 3.3 e 3.4), fez-se a sua análise numa mesa de coordenadas X-Y (figuras 3.5 e 3.6). Os materiais/equipamentos utilizados durante as medições efectuadas constou de uma placa de metal com 9 provetes, correspondentes a uma ligação soldada em T, uma mesa de coordenadas X-Y, um sistema óptico com ampliação de (x10) e uma lente (x1) (figura 3.7), material de fixação dos provetes e um equipamento associado à mesa de coordenadas X-Y, da marca MAXTASCAN (Leitor + Ecrã) (figura 3.8).

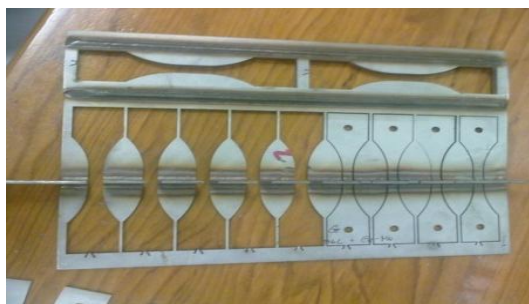


Figura 3.3- Placa com provetes



Figura 3.4- Placa com provetes (Vista Lat.)



Figura 3.5- Mesa de coordenadas



Figura 3.6- Mesa de coordenadas 2



**Figura 3.7- Câmara do equipamento óptico**



**Figura 3.8- Ecrã + registo de posição (MAXTASCAN)**

### **Procedimento experimental para caracterização geométrica dos provetes:**

- 1) Em primeiro lugar retiraram-se os provetes da placa de metal soldada. Os provetes foram obtidos por intermédio do processo de corte por jacto de água.
- 2) Numeraram-se os provetes de 1 a 9.
- 3) Colocou-se o provete n.º 1 na mesa de coordenadas e ligou-se o MAXTASCAN (Figura 3.8).
- 4) Focou-se a zona a ser medida usando a lente do microscópio.
- 5) Orientou-se o provete de forma a que duas arestas concorrentes fossem o mais coincidentes possível com os eixos X e Y do microscópio/ecrã (Figura 3.7)
- 6) Numeraram-se alguns pontos do provete e atribui-se a coordenada (0,0) a um ponto específico do provete (Figura 3.10)
- 7) Registaram-se as coordenadas dos pontos referenciados (Figura 3.10) através da utilização do MAXTASCAN
- 8) Depois de terem sido registados todos os pontos colocou-se o provete 1 sob a vista lateral de modo a determinar as coordenadas dos pontos da vista lateral (figura 3.10).
- 9) Definiu-se novamente a coordenada (0,0) e repetiram-se as alíneas 6 e 7.
- 10) Repetiu-se o procedimento para os restantes provetes (Anexo A).



Figura 3.9- Provete sob a mesa de coordenadas

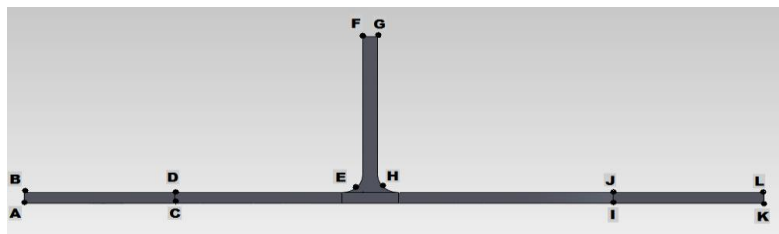
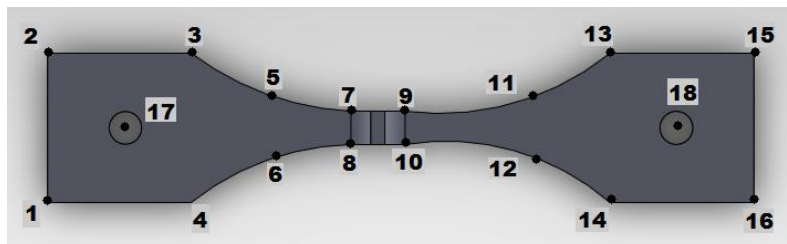
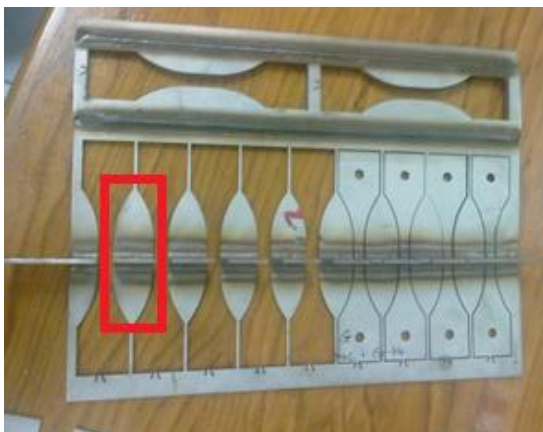


Figura 3.10- Pontos analisados no MAXTASCAN (vista de topo e vista lateral)

### 3.2.2 Polimento dos provetes e ataque químico

Com o polimento das superfícies e o ataque químico das superfícies polidas (figura 3.1), pretendia-se evidenciar os diferentes materiais constituintes da ligação soldada em análise, isto é, os materiais da chapa principal e do cutelo, o material de adição da soldadura, assim como a profundidade de penetração do cordão de soldadura. Os equipamentos e agentes químicos utilizados durante esta fase da tese foram: máquina de polimento com lixas de diferentes granulometrias: 120- 220- 400- 800- e 1200 (figura 3.12), máquina de polimento com panos, líquido de polimento com grânulos com  $0,05 \mu\text{m}$  de diâmetro, água destilada ( $\text{H}_2\text{O}$ ), ácido clorídrico ( $\text{HCl}$ ), ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), ácido oxálico, metanol, copo de precipitação, vareta, pipeta, exaustor, cronómetro, microscópio (x10) + Lente (x40) e equipamento MAXTASCAN associado ao sistema óptico (x10) + Lente (x1).



**Figura 3.11- Provete 10 (usado para o polimento)**



**Figura 3.12- Polideira com lixas e com panos**

#### **Procedimento experimental:**

- 1) Para não se desperdiçar nenhum provete no polimento, usou-se a zona entre provetes da placa inicial (Figura 3.11). Para se retirar essa zona central entre provetes da placa utilizou-se uma rebarbadora com disco de alta velocidade, de modo a quebrar a ligação entre a placa e este novo provete, que se denominou de provete 10.
- 2) Com um leque de lixas, com granulometria 80 (Figura 3.13), montado numa máquina rotativa de alta velocidade (Figura 3.13), fez-se a remoção de uma fina camada de material existente na superfície lateral do provete e iniciou-se o polimento da superfície lateral do provete, de forma a esta ficar plana e com um bom acabamento superficial, isenta das irregularidades superficiais introduzidas pelo processo de corte por jacto de água.
- 3) Finda a etapa anterior, colocou-se uma lixa de granulometria 120 na máquina de polimentos com lixa, ligou-se a água, e colocou-se o provete com a face lateral voltada para baixo, de modo a proceder ao polimento da zona soldada, com uma velocidade de rotação do prato de cerca de 100 r.p.m..
- 4) Após alguns minutos de polimento do provete repetiu-se o procedimento da alínea 3) para lixas com granulometria de 220, 400, 800 e 1200.
- 5) Uma vez terminado o polimento com lixas, fez-se o polimento na máquina de polimento com panos e, ao invés de usar água como substância lubrificante e de limpeza, usou-se um líquido contendo álcool e uma pasta de polimento com grânulos de alumina de tamanho de grão de  $0,05\ \mu\text{m}$ .



- 6) Após o polimento, fez-se o ataque químico da superfície lateral do provete, de forma a evidenciar os diferentes materiais utilizados na ligação soldada. Começou-se então por utilizar uma primeira solução para fazer o ataque químico, que constava de 100 ml de  $H_2O$  num copo de precipitação e 15 ml HCl e 5 ml  $HNO_3$  [22]. Nesta altura, ligou-se o exaustor. Com a ajuda de uma pipeta e o exaustor ligado, fez-se a mistura dos componentes.
- 7) Misturou-se a solução no copo de precipitação com uma vareta e colocou-se a solução num recipiente cilíndrico de vidro. Mergulhou-se o provete na solução química, com a face lateral voltada para baixo, durante 2 minutos e observou-se o resultado.
- 8) Repetiu-se o procedimento descrito na alínea 6 e 7 usando duas diferentes soluções químicas: 100 ml de  $H_2O$  e 10 gr de ácido oxálico [22] e 45ml de HCl, 15ml de  $HNO_3$  e 5ml de metanol [22]. Após cada solução química aplicada observaram-se os resultados do ataque químico, tendo sido utilizado o microscópio.



**Figura 3.13- Rebarbadora a alisar a zona arredondada do provete 10**

### **3.2.3 Ensaios de Dureza**

Os ensaios de dureza tiveram como objectivo verificar a homogeneidade das várias zonas da ligação soldada, inferir sobre as propriedades mecânicas das várias zonas da ligação soldada e definir os valores de dureza nas zonas de maior interesse, nomeadamente, no material base da chapa, no material base do cutelo, no cordão de soldadura e na zona termicamente afectada pela soldadura. Os procedimentos inerentes à medição da dureza foram efectuados de acordo com o indicado na norma NP EN 1043-1 [23]. Como, na norma

referenciada [23], a linha de indentações não é aplicável para metais austeníticos, seguiu-se a mesma norma para definir a localização das indentações individuais.

Para os ensaios de dureza utilizou-se o provete previamente polido e um durómetro da marca *Mitutoyo* (figura 3.14). O procedimento de ensaio utilizado descreve-se em seguida:

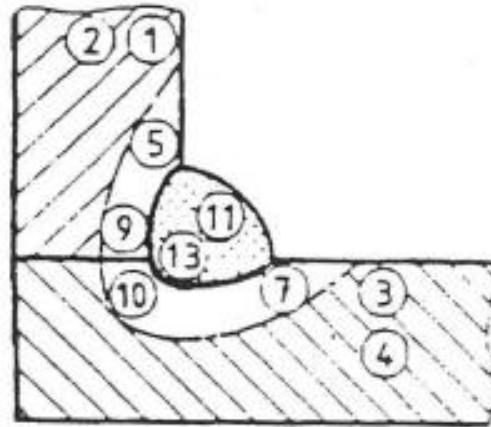
**Procedimento experimental:**

- 1) Fixou-se o provete na máquina de ensaios de dureza de modo a poder efectuar os ensaios nas zonas de interesse (figura 3.15) definidas pela norma NP EN 1043-1 e focou-se a superfície de ensaio.
- 2) Efectuaram-se dois testes de dureza preliminares, no material mais macio da ligação soldada, de forma a verificar a massa mais adequada à realização do teste (figura 3.16), que permitisse obter diagonais de indentação bem definidas em ambos os materiais. No primeiro teste usou-se 1 kg e no segundo teste 2 kg.
- 3) Regulou-se o tempo para realizar a indentação em 15 seg e a medida de dureza em Vickers (HV) (figura 3.16).
- 4) Após verificação de que a carga de 20 N (2 kgf) se adequava bem à determinação dos valores de dureza pretendidos nos vários materiais sob análise, deu-se início aos ensaios.
- 5) Através de fusos de alta precisão, posicionou-se o provete segundo a direcção x e y no ponto de interesse.
- 6) Mudou-se a lente para o indentador e procedeu-se ao ensaio de dureza (figura 3.17).
- 7) Após 15 seg, tendo sido feita a indentação, mudou-se do indentador para a lente do microscópio (figura 3.18), observou-se o losango resultante da indentação e procedeu-se à medição das diagonais perpendiculares do losango.
- 8) De seguida, verificou-se no leitor o valor da dureza, em HV, e registou-se esse valor (figura 3.19).
- 9) Repetiram-se os procedimentos descritos nas alíneas 6 a 9 para os vários pontos de interesse.
- 10) Retirou-se o provete da máquina de dureza e colocou-se o mesmo no MAXTASCAN, de modo a visualizarem-se as indentações nas zonas de interesse.





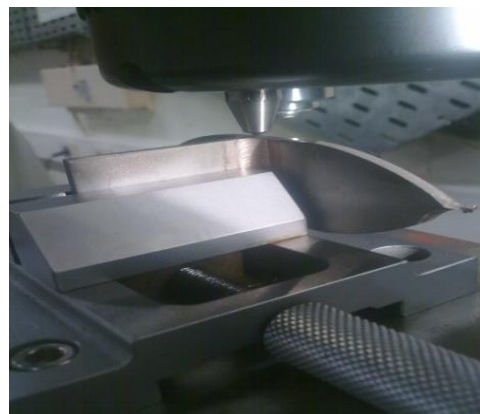
**Figura 3.14- Máquina para determinação de macro-durezas da marca Mitutoyo**



**Figura 3.15- Zonas das indentações individuais de cordões de canto**



**Figura 3.16- Parâmetros dos ensaios de dureza (botões à esquerda para definição da lente, tempo e unidade de dureza. Botão da direita para definição da massa.**



**Figura 3.17- Provete a ser indentedo**



**Figura 3.18- Microscópio da máquina de dureza**



**Figura 3.19- Leitor da máquina de durezas com indicação do comprimento das diagonais e o valor da dureza (HV)**

### **3.3 Materiais do provete e principais propriedades mecânicas e físicas**

Os materiais dos provetes e as suas propriedades mecânicas foram determinados num estudo prévio. Foram fornecidos os seguintes dados para os materiais e propriedades mecânicas e físicas dos provetes .

**Tabela 3.1- Materiais e propriedades mecânicas e físicas dos provetes**

<b>Material da chapa</b>	Cr-Mn
<b>Material do cutelo</b>	AISI 316L
<b>Tensão de rotura do aço Cr-Mn a 350°C</b>	510 MPa
<b>Tensão de cedência do aço Cr-Mn a 350°C</b>	270 MPa
<b>Tensão de rotura do aço Cr-Mn a 24°C</b>	800 MPa
<b>Tensão de cedência do aço Cr-Mn a 24°C</b>	480 MPa
<b>Tensão de rotura do aço AISI316L a 350°C</b>	430 MPa
<b>Tensão de cedência do aço AISI316L a 350°C</b>	190 MPa
<b>Tensão de rotura do aço AISI316L a 24°C</b>	600 MPa
<b>Tensão de cedência do aço AISI316L a 24°C</b>	290 MPa
<b>Módulo de Elasticidade longitudinal</b>	193 GPa
<b>Ductilidade a 350°C</b>	>0.3 (30%)

Massa volúmica	8000 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura de fusão	1375-1400 °C
Permeabilidade magnética	1.02
Condutividade térmica a 100°C	16.2 W/m °K
Condutividade térmica a 500°C	21.5 W/m °K
Coeficiente de dilatação linear 0-100 °C	15.9 x 10 <sup>-6</sup> /°C
Coeficiente de dilatação linear 0-315 °C	16.2 x 10 <sup>-6</sup> /°C
Coeficiente de dilatação linear 0-538 °C	17.5 x 10 <sup>-6</sup> /°C

### 3.4 Análise estrutural, pelo Método dos Elementos Finitos, do detalhe estrutural catalogado (provetes de referência)

Em primeiro lugar identificou-se o detalhe catalogado mais semelhante ao detalhe estrutural sob estudo, tendo em conta a geometria, a classe de fadiga (FAT), a direcção da tensão nominal aplicada e a localização mais provável da fenda aberta por fadiga.

Para fazer a análise à fadiga é necessário ter em conta as seguintes curvas de fadiga (figura 3.20).

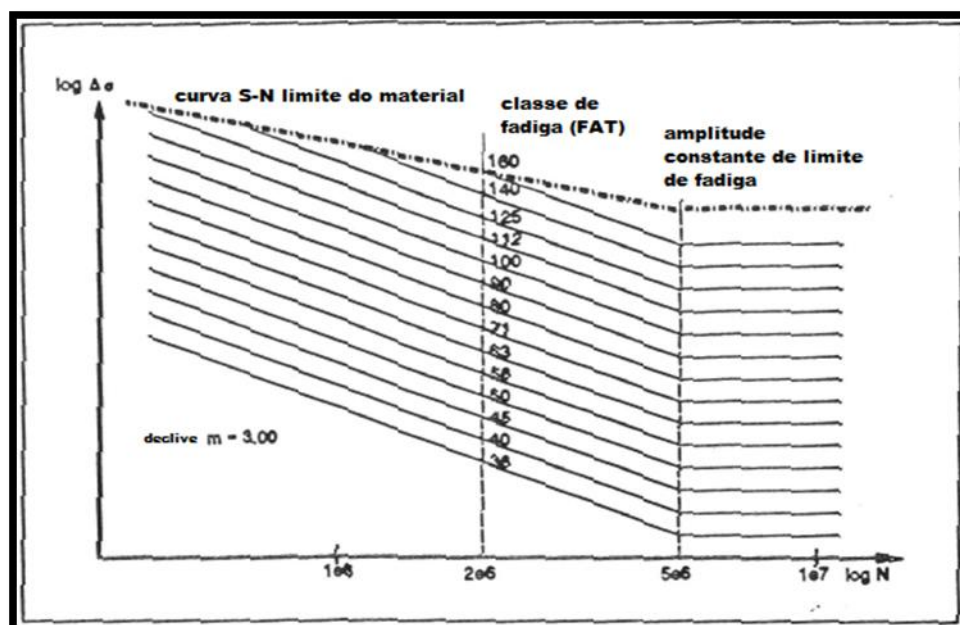


Figura 3.20- Curvas S-N de resistência à fadiga para m=3, tensão normal (aço) (adaptado de [8])

### 3.4.1 FAT do detalhe catalogado

O detalhe catalogado mais aproximado da ligação soldada em T sob estudo tem o número 511 (figura 3.21). Trata-se de uma ligação soldada em T, com cordões de ângulo, sem transferência de carga, com aplicação transversal da carga, com a condição “como soldado”, donde se obtém uma FAT de 80 (gama de tensão nominal igual a 80 MPa correspondente a uma vida à fadiga de 2 milhões de ciclos).

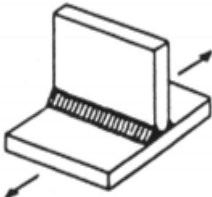
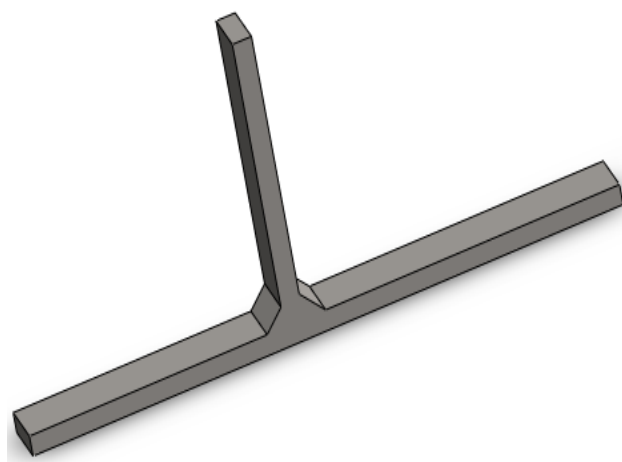
No.	Detalhe estrutural (aço estrutural)	Descrição	FAT
500	Ligações sem transferência de carga		
511		<b>Ligação transversa sem transferência de carga, não é mais espesso que a placa principal</b> <b>Soldadura de canto, "como soldado"</b> <b>Menos espesso que a placa principal</b>	80 71

Figura 3.21- Detalhe catalogado mais aproximado

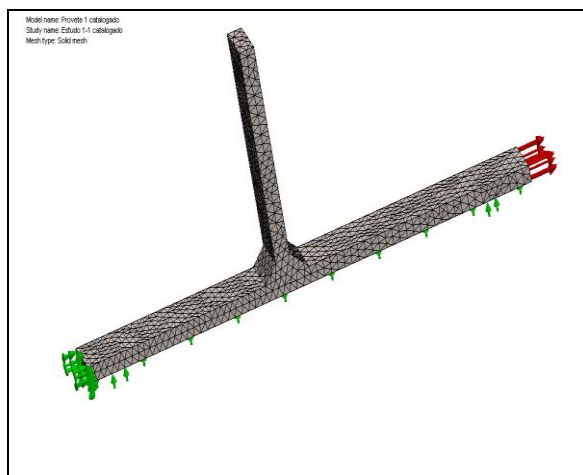
### Determinação da Tensão Principal máxima no detalhe catalogado

Para determinar a tensão principal máxima, de tipo estrutural/crítica (*hot spot*), induzida no detalhe catalogado assumiu-se uma secção como a indicada na figura 3.21 com cordões de soldadura em forma de triângulo, fazendo um ângulo de 45° com ambas as placas, com penetração total (figura 3.22). A análise das tensões induzidas foi efectuada aplicando uma tensão de 100 N/m<sup>2</sup> numa face da chapa principal transversal ao cordão de soldadura e considerando encastramento na face oposta. Concomitantemente, definiu-se a condição de simplesmente apoiada na face inferior da chapa principal e na face vista de frente, de forma a não ocorrer flexão do provete. A espessura da chapa principal e do cutelo foi considerada aproximadamente igual a 2.7mm e a distância entre o pé do cordão de cada uma das duas soldaduras de canto, L, foi ajustado aos valores medidos em cada provete a ensaiar (Anexo A).

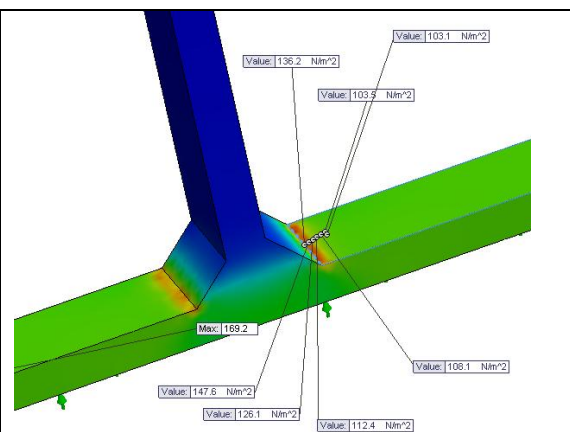


**Figura 3.22- Provetes catalogados**

As imagens com a malha de elementos finitos e a distribuição de tensão principal máxima obtidas no provete 1 encontram-se nas figuras 3.23 e 3.24, respectivamente. Seguindo as recomendações do IIW para o cálculo da tensão estrutural, retirou-se da análise realizada pelo método dos métodos finitos a tensão principal máxima a  $0,4t$  e a  $0,6t$  do ponto crítico (isto é, do pé do cordão de soldadura), sendo  $t$  a espessura da chapa que se considerou igual a 2,7 mm. Logo, os pontos a analisar estavam a 1,1 mm e a 2,7 mm do ponto crítico.



**Figura 3.23- Malha de elementos finitos e condições de fronteira aplicadas nos provetes**



**Figura 3.24- Análise da tensão principal máxima**

A tabela 3.2 sintetiza os valores da tensão principal máxima obtidos no pé do cordão de soldadura de cada provete simulado numericamente e os valores do factor de concentração de tensões respectivos. No Anexo F podem encontrar-se as imagens da distribuição dos valores de tensão principal máxima obtidos nos diferentes provetes ensaiados. Para obtenção da

tensão estrutural procedeu-se à extrapolação das tensões medidas no MEF de forma semelhante à figura 2.12.

**Tabela 3.2- Tensão principal máxima estrutural e no entalhe de cada provete (como catalogado)**

<b>Provetes (N.m<sup>2</sup>) (catalogados)</b>						
	<b>Provete 1</b>	<b>Provete 2</b>	<b>Provete 3</b>	<b>Provete 4</b>	<b>Provete 5</b>	<b>Provete 6</b>
<b>Tensão principal máxima a 0,4t [MPa]</b>	<b>110.5</b>	<b>110.7</b>	<b>110.9</b>	<b>110.7</b>	<b>110.9</b>	<b>109.5</b>
<b>Tensão principal máxima a t [MPa]</b>	<b>100.1</b>	<b>99.5</b>	<b>99.7</b>	<b>99.9</b>	<b>99.7</b>	<b>99.1</b>
<b>Tensão estrutural [MPa]</b>	<b>117.7</b>	<b>118.4</b>	<b>118.6</b>	<b>118.1</b>	<b>118.6</b>	<b>116.7</b>
<b>Tensão local [MPa]</b>	<b>163.3</b>	<b>172.7</b>	<b>170.0</b>	<b>164.7</b>	<b>147.8</b>	<b>182.7</b>

### **3.4.2 Determinação do Factor de Concentração de Tensões do detalhe catalogado**

Da observação da tabela 3.3 conclui-se que o factor de concentração de tensões estruturais varia entre 1.17 e 1.19.

**Tabela 3.3- Factor de concentração de tensões**

<b>Provetes (catalogados)</b>						
	<b>Provete 1</b>	<b>Provete 2</b>	<b>Provete 3</b>	<b>Provete 4</b>	<b>Provete 5</b>	<b>Provete 6</b>
<b>Tensão aplicada (Pa)</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
<b>Factor de Concentração de Tensões</b>	<b>1.18</b>	<b>1.18</b>	<b>1.19</b>	<b>1.18</b>	<b>1.19</b>	<b>1.17</b>

### 3.5 Análise por meio do Método dos Elementos Finitos dos provetes ensaiados

#### 3.5.1 Determinação da Tensão Principal Máxima

Nas figuras 3.25 e 3.26 estão visíveis as condições de fronteira na modelação por meio finitos dos provetes ensaiados e a malhagem utilizada. Na figura 3.27 pode-se observar a distribuição de tensões do provete ensaiado.

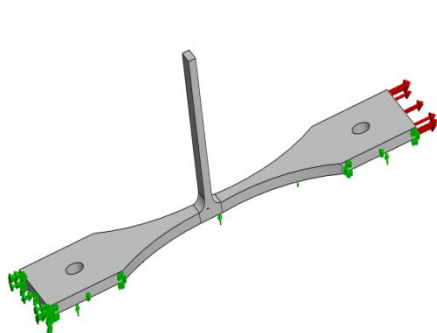


Figura 3.25- Apoios fixos do provete e pressão aplicada

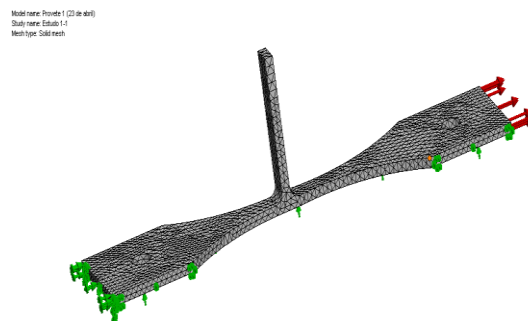


Figura 3.26-Malha de elementos finitos do provete

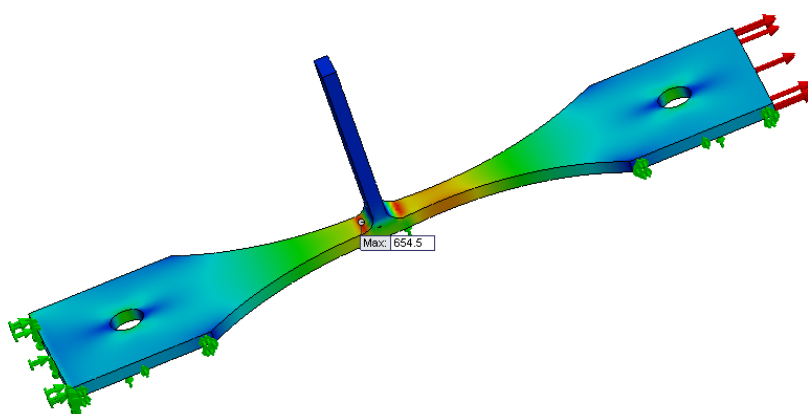


Figura 3.27-Distribuição da tensão principal máxima do provete1 ensaiado

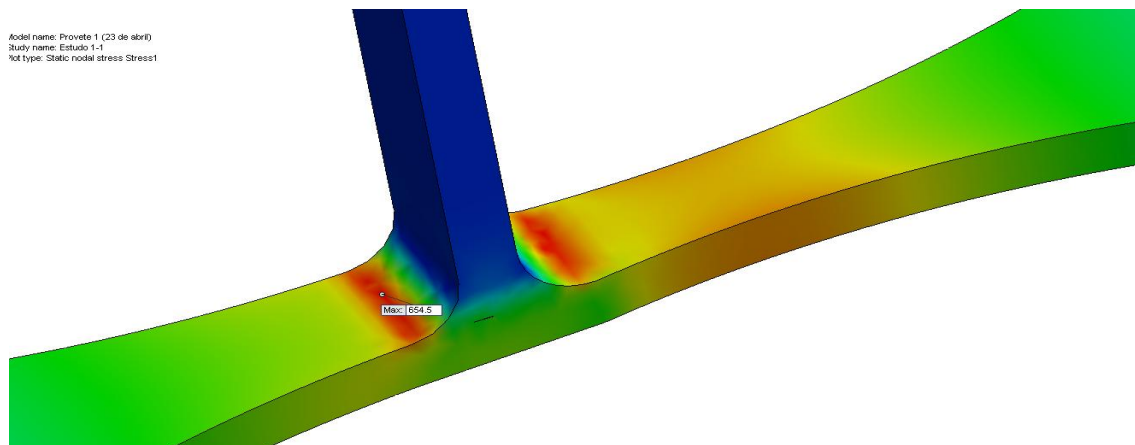


Figura 3.28- Análise da tensão principal máxima do provete 1 ensaiado (cordão)

Tabela 3.4- Factor de concentração de tensões de cada provete (ensaiado)

	Provetes (ensaiados)					
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Provete 6
Tensão principal máxima a 0,4t [MPa]	502.5	467.8	485.2	492.5	461.2	475.9
Tensão principal máxima a t [MPa]	489.7	453.8	479.0	482.7	458.5	465
Tensão estrutural [MPa]	511.3	477.43	489.13	499.24	463.06	483.39
Tensão local [MPa]	609.2	563.6	565.1	563.4	546.6	569.6

Tabela 3.5- Factor de concentração de tensões

	Provetes (catalogados)					
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Provete 6
Tensão nominal $\approx$ tensão principal máxima a t (MPa)	489.7	453.8	479.0	482.7	458.5	465
Factor de Concentração de Tensões	1.04	1.05	1.02	1.03	1.01	1.04



### 3.5.2 Cálculo da Classe de Fadiga (FAT) dos provetes

Usando a equação 2.2:

$$FAT_{avaliada} = \frac{\sigma_{est,ref}}{\sigma_{est,avaliada}} \cdot FAT_{ref}$$

que relaciona a tensão estrutural do detalhe catalogado com a tensão estrutural do detalhe real obteve-se a tabela 3.6 com os valores da classe de fadiga para cada provete tendo em conta que a classe de fadiga do detalhe estrutural é 80.

Tabela 3.6- Classe de fadiga real

	Provetes (N.m <sup>2</sup> )					
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Provete 6
Tensão estrutural do detalhe catalogado, est,ref [MPa]	117.7	118.4	118.6	118.1	118.6	116.7
Tensão estrutural do detalhe real, est,avaliada [MPa]	104.0	105.0	102.0	103.0	101.0	104.0
FAT real [MPa]	91	90	93	92	94	90

Os valores determinados para a tensão estrutural do detalhe real foram determinados com base na fórmula  $\sigma_{est} = k_t \cdot \sigma_{nom}$ , donde viu-se que  $k_t$  é dado na tabela 3.5 e a tensão nominal é a pressão aplicada à peça, neste caso, 100 MPa. Pode concluir-se que a classe de fadiga (FAT) se encontra entre as curvas indicadas na Figura 3.29.

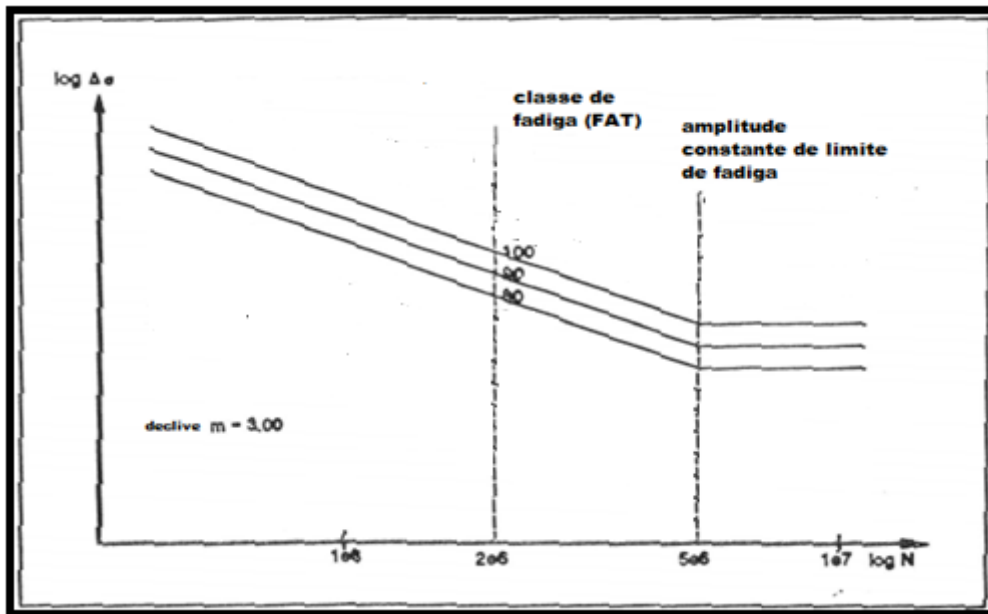


Figura 3.29- Curvas de fadiga estimadas

## 3.6 Ensaios experimentais à fadiga

### Introdução

Em condições normais de funcionamento, os materiais, regra geral, são submetidos a tensões inferiores ao limite elástico do material, que corresponde à tensão máxima que o material pode suportar sem apresentar deformação permanente. No entanto, esses materiais podem, após algum tempo de uso, apresentar pontos com nucleação e propagação de fendas, por exemplo por fadiga, que podem resultar na fractura do componente sem aviso prévio.

Os ensaios de resistência à fadiga visam determinar o tempo de utilização expectável, sem fractura devida à fadiga, dos componentes.



Existem vários factores que influenciam a resistência à fadiga dos materiais. Uma superfície com mau acabamento superficial contém irregularidades que são tidas em conta como entalhes situados na superfície dos materiais e, conseqüentemente, esses entalhes provocam concentração de tensões que diminuem a resistência à fadiga. Recomenda-se o polimento da peça para reduzir o factor anterior. Outros factores que também afectam a vida à fadiga podem ser a dimensão das peças (quanto mais espessas, menor tenderá a ser a vida à fadiga do componente), a temperatura de serviço, baixando a resistência à fadiga com o aumento da temperatura aplicada, as tensões residuais existentes na peça, o nível de tensão, a corrosão, ou não, do meio ambiente, etc.

## Objectivos

Feita a estimativa da classe de fadiga do detalhe estrutural sob estudo (FAT), decidiu-se determinar, através de ensaios de fadiga, a curva de resistência à fadiga da ligação soldada em T. À semelhança do que está definido no documento do IIW [2], considerou-se a existência de vida infinita para os 5 milhões de ciclos aplicados. Estes ensaios têm em conta o facto de não se poder ultrapassar uma vez e meia o valor da tensão limite de elasticidade do material para o valor de gama de tensão máxima nominal aplicada.

## Material Utilizado

As superfícies laterais dos provetes utilizados nos ensaios à fadiga foram rectificadas e polidas com uma ponta feita de um material abrasivo e do leque de lixas acoplado à máquina de alta rotação (figura 3.30 e 3.31).

	
<b>Figura 3.30- Máquina rotativa</b>	<b>Figura 3.31- Ponteira fabricada em material abrasivo e leque de lixas</b>

## Procedimento Experimental

- 1) Devido ao facto de o provete ter que ser solicitado através de cavilhas, tal obriga à existência de dois furos, cada um na extremidade do provete de ensaio, com diâmetro de 7 mm.
- 2) Procedeu-se ao polimento dos provetes, com uma ponteira de alta velocidade, à qual estava acoplada um abrasivo ou um leque de lixas (figura 3.31).
- 3) Após o polimento do provete, calculou-se a área resistente do provete através da mesa de coordenadas.

- 4) Repetiu-se o procedimento da alínea 1 a 3 para os restantes provetes.
- 5) Ligou-se a máquina de ensaios de fadiga.
- 6) Os ensaios à fadiga foram conduzidos usando os seguintes parâmetros genéricos:

**Tabela 3.7- Parâmetros genéricos dos ensaios à fadiga**

<b>Frequência (f)</b>	5 Hz	
<b>Limite de força</b>	-1 kN	5 kN
<b>Limite de deslocamento</b>	54 mm	76 mm
<b>Número máximo de ciclos</b>	6 000 000 ciclos	
<b>Temperatura do ensaio</b>	350°C	

- 7) Após a fractura dos provetes, desligou-se a máquina servohidráulica.



**Figura 3.32- Provede 1 na máquina de ensaios**

## **4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS**



## 4.1 Análise e resultados da determinação da geometria dos provetes

Tabela 4.1- Coordenadas do provete 1 da vista de topo do provete

Ponto	X	Y	RAIO
1	0	0	-
2	1.178	29.892	-
3	30.097	28.646	-
4	29.248	-1.212	-
5	-	-	58.289
6	-	-	60.524
7	62.677	15.751	-
8	64.421	9.189	-
9	72.669	15.401	-
10	72.442	8.811	-
11	-	-	59.372
12	-	-	55.392
13	114.990	25.136	-
14	113.925	-4.669	-
15	144.236	23.821	-
16	142.917	-6.139	-
17	16.456	14.141	3.292
18	127.714	9.336	3.268

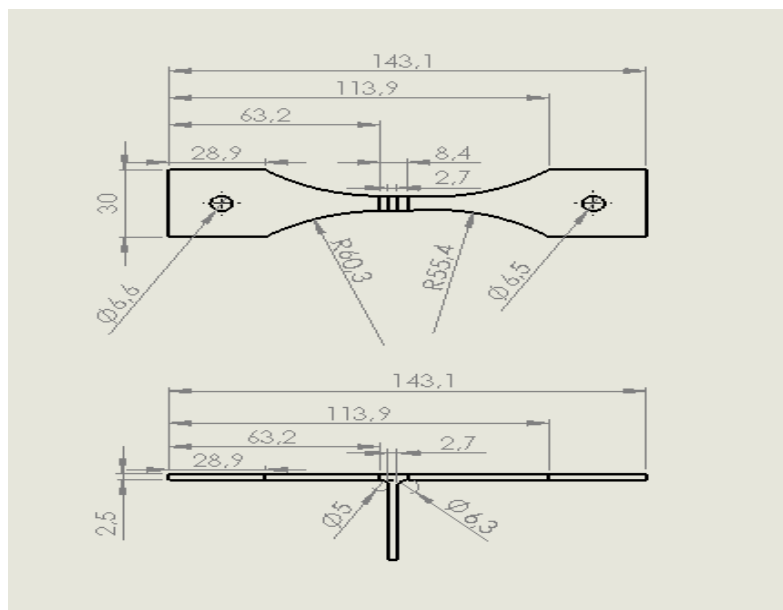
**Tabela 4.2- Coordenadas do provete 1 da vista lateral do provete**

<b>Ponto</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>RAIO</b>
<b>A</b>	0.312	-2.485	-
<b>B</b>	0	0	-
<b>C</b>	28.334	-3.045	-
<b>D</b>	28.379	-0.570	-
<b>E</b>	-	-	2.524
<b>F</b>	64.601	38.105	-
<b>G</b>	67.379	38.331	-
<b>H</b>	-	-	3.153
<b>I</b>	113.163	-6.485	-
<b>J</b>	113.414	-4.035	-
<b>K</b>	142.353	-8.195	-
<b>L</b>	142.357	-5.730	-

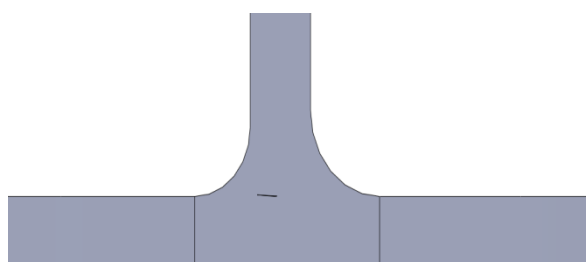
Nos provetes analisados verificou-se que a zona sem penetração era diferente de provete para provete. Para uma melhor caracterização foram retirados as posições de 3 ou 6 pontos, dependendo de o provete apresentar penetração total, parcial, ou sem penetração de ambos os lados. De referir que as coordenadas dos pontos foram obtidas em relação ao ponto 1 de cada provete. Pode observar-se a geometria da zona sem penetração no Anexo B e alguns defeitos dos provetes no Anexo C.

Após a medição dos provetes, estes foram modelados tridimensionalmente. Nas figuras 4.2 e 4.3 podem observar os modelos dos provetes 1 e 2, respectivamente, e no anexo D as ligações não soldadas dos restantes provetes. Algumas características geométricas dos provetes ensaiados (figura 4.4), tais como a espessura da chapa principal, do cordão e a distância entre os pés dos cordões de soldadura são fornecidas na tabela 4.3.

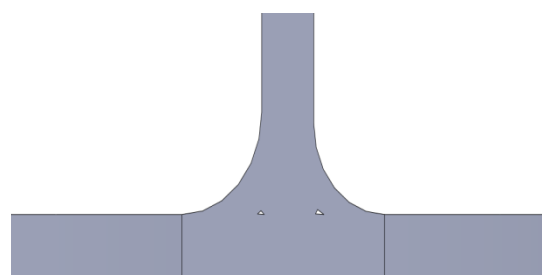




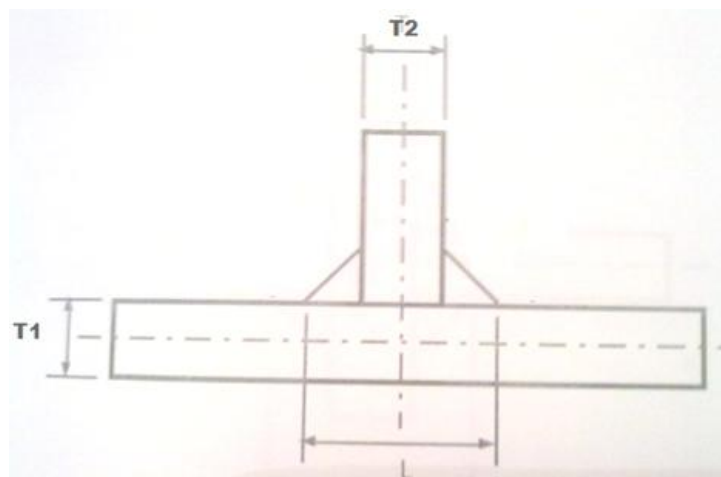
**Figura 4.1- Dimensões finais do provete 1**



**Figura 4.2- Modelação 3D da zona sem penetração do provete 1**



**Figura 4.3- Modelação 3D da zona não soldada do provete 2**



**Figura 4.4- Ligações em T sem transferência de carga: espessura da chapa principal (T1), espessura da chapa do cutelo (T2) e da distância entre os pés dos cordões de soldadura (L) (adaptado de [21])**

**Tabela 4.3- Parâmetros T1, T2 e L medidos nas ligações soldadas em T sem transferência de carga**

Provete Nº	T1	T2	L
1	2.505	2.749	8.426
2	2.523	2.629	10.225
3	2.441	2.858	10.971
4	2.514	2.504	10.887
5	2.442	2.669	11.064
6	2.415	2.665	10.398

## **4.2 Observação das superfícies atacadas quimicamente e análise e discussão dos resultados**

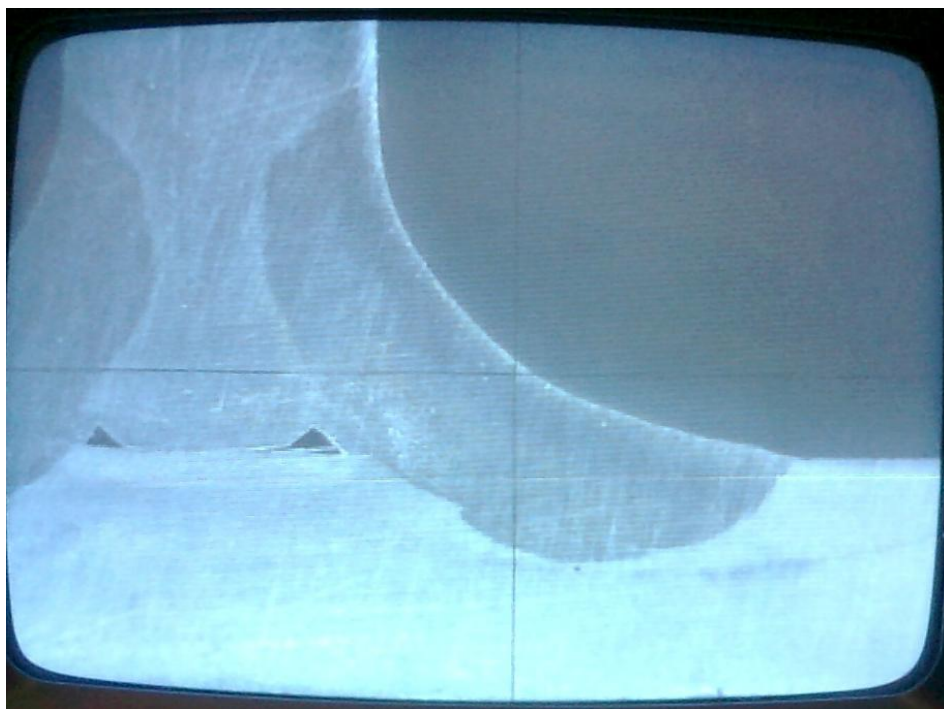
A opção de usar a zona soldada entre provetes para polimento demonstrou ser correcta porque conseguiu-se observar a soldadura existente nos provetes sem ser necessário o desperdício de um provete. Como se pode observar pelas figuras 4.5 e 4.6, consegue-se identificar os materiais da chapa principal e do cutelo, o cordão de soldadura e ainda a zona sem penetração. Na zona do cordão de soldadura é visível a penetração parcial do cordão no material da chapa principal (Cr-Mn) e no material do cutelo (AISI 316L).

Quanto ao ataque químico, verificou-se uma melhor visualização dos diferentes materiais quando se utilizou uma solução sem H<sub>2</sub>O. Observou-se também que o material da

chapa principal (Cr-Mn) era mais afectado pelo ataque químico do que o material do cutelo (AISI 316L) e do que o material de adição. No entanto, não se conseguiu observar com clareza a ferrite e austenite da peça, assim como, os limites de grão dos materiais.



**Figura 4.5- Macrografia do cordão esquerdo do provete 10**



**Figura 4.6- Macrografia do cordão direito do provete 10**

### 4.3 Resultados experimentais dos Ensaios de Dureza

Na figura 3.15 são apresentadas algumas localizações típicas para as indentações individuais necessárias à medição da dureza nas ligações em T com cordões de ângulo. As zonas 1 e 2 referem-se ao material do cutelo, as zonas 3 e 4 ao material da chapa principal, as zonas 5, 7, 9 e 10 referem-se à zona termicamente afectada (HAZ) e finalmente as zonas 11 e 13 referem-se ao material de adição.

Na Tabela 4.4 e na Tabela 4.5 apresentam-se alguns valores de dureza medidos durante os ensaios preliminares e finais, respectivamente. Dos testes iniciais verificou-se que a carga que efectuava uma indentação mais bem definida no provete, maior e mais fácil de medir, era a carga de 2 kg. A carga de 1 kg provocava uma indentação distorcida, pouco definida, sendo mais difícil de verificar onde se encontrava o início e o fim de cada diagonal.

Em anexo (Anexo E) apresentam-se as macrografias correspondentes aos ensaios indicados na tabela 4.5.

**Tabela 4.4- Ensaios de dureza de teste**

	<b>Carga</b>	<b>Diagonal 1</b>	<b>Diagonal 2</b>	<b>Dureza</b>
<b>Teste 1</b>	2 kg	135.4 $\mu\text{m}$	135.1 $\mu\text{m}$	203 HV2
<b>Teste 2</b>	1 kg	96.4 $\mu\text{m}$	96.1 $\mu\text{m}$	200 HV1

Após determinação dos valores de dureza para os diferentes pontos indicados na norma pôde observar-se que o material da chapa principal (Cr-Mn) apresentava uma maior dureza que a do metal do cutelo (AISI 316L), indiciando um aço de mais alta resistência à tracção.

A zona do metal de adição apresenta valores intermédios entre o metal base da chapa e do metal do cutelo. A zona termicamente afectada apresenta valores próximos dos da vizinhança (quer do metal da chapa principal quer do metal do cutelo), isto é, apesar dos valores serem muito próximos podemos concluir que existe um amaciamento estrutural devido aos efeitos térmicos decorrentes da operação de soldadura.

Tabela 4.5- Ensaios de dureza individuais

Área			Posição das indentações	Diagonal principal 1 (µm)	Diagonal principal 2 (µm)	Valore da dureza individuais (HV2)
Metal base do cutelo  (AISI 316L)	Metal não afectado	1	Metal do cutelo, não afectado, superfície (a 0,5mm da superfície)	132.9	131.8	212
		2	Metal do cutelo, não afectado, centro (a 1mm da superfície)	128.7	129.2	223
	HAZ	5	Metal principal, zona termicamente afectada, topo da soldadura (a 1mm da superfície e a 0,5mm da linha de fusão)	125.4	126.9	233
		9	Metal principal, zona termicamente afectada, passe de raiz, interior (linha de fusão)	132.3	132.8	211
Metal de base da chapa  (Cr-Mn)	Metal não afectado	3	Metal principal, não afectado, centro (a 1mm da superfície)	114.1	113.5	286
		4	Metal principal, não afectado, centro (a 0,5mm da superfície)	113.5	113.5	294
	HAZ	7	Metal principal, zona termicamente afectada, topo da soldadura (a 1mm da superfície e a 0,5mm da linha de fusão)	112.8	113.1	291
		10	Metal principal, zona termicamente afectada, passe de raiz, interior (linha de fusão)	119.1	119.5	261
Metal de adição		11	Metal de soldadura, passe final (a 1 mm da superfície do cordão)	123.2	119.7	251
		13	Metal de soldadura, passe final (a 1 mm da linha de fusão)	132.4	132.4	212

#### 4.4 Resultados Experimentais dos Ensaaios de Fadiga

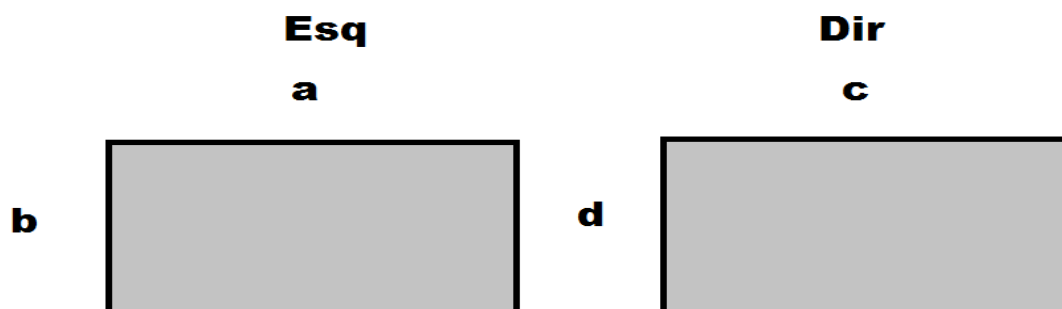


Figura 4.7- Dimensões da área resistente de ambos os lados da peça

Tabela 4.6- Dimensões e Parâmetros iniciais de cada provete

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Provete 6
Tensão mínima [MPa]	21,6	24,3	24,3	24,3	45,0	45,0
a [mm]	6,32	6,32	6,43	6,08	6,24	6,13
b [mm]	2,67	2,58	2,63	2,71	2,58	2,63
c [mm]	6,42	6,45	6,31	6,25	6,57	6,61
d [mm]	2,63	2,56	2,63	2,57	2,56	2,62
Área1 [mm <sup>2</sup> ]	16,86	16,29	16,91	16,46	16,12	16,12
Área2 [mm <sup>2</sup> ]	16,90	16,50	16,62	16,03	16,82	17,35
Área resistente [mm <sup>2</sup> ]	16,86	16,29	16,62	16,03	16,12	16,12
Força máxima [kN]	3,64	3,96	4,04	3,90	7,26	7,25
Força mínima [kN]	0,364	0,396	0,404	0,390	0,726	0,725
Gama de tensão [Δσ, MPa]	194,4	218,7	218,7	218,7	405,0	405,0
Força média [kN]	2,003	2,178	2,221	2,143	3,990	3,989



**Figura 4.8- Aspecto do controlador da máquina no decorrer do ensaio à fadiga do provete teste e provete 1 a ser ensaiado**

Os níveis de tensão avaliados correspondem a 0,8 e 0,9 da tensão de cedência do material e a 1,5 da gama da tensão de cedência (tabela 4.8).

**Tabela 4.7- Níveis de tensão utilizados para os ensaios de fadiga**

Patamar	$\Delta\sigma$ [MPa]
I	194.4
II	218.7
III	405.0

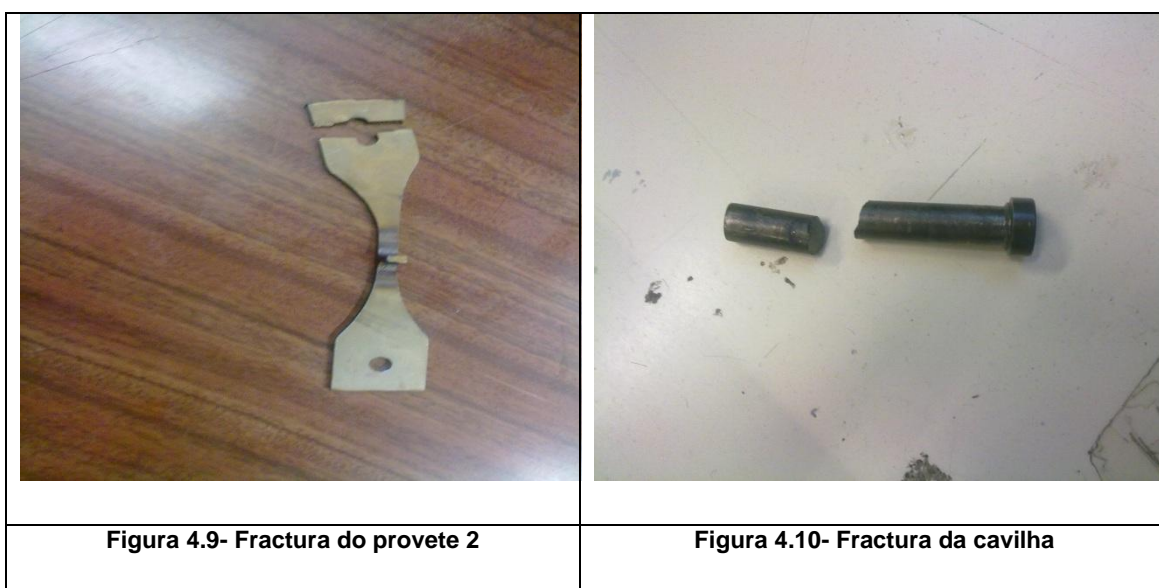
Na tabela 4.7, para cálculo da força máxima foi usada a seguinte equação que relaciona o nível de tensão pretendido com a área resistente:  $F_{max} = \sigma_{max} \times A_{res}$  (equação 4.1). A força mínima foi calculada usando a razão de tensões:  $F_{min} = R \times F_{max}$  (sendo R, a razão de tensões,  $R=0,1$ ) (equação 4.2). A força média foi calculada usando a equação:  $F_{med} = \frac{F_{max} + F_{min}}{2}$  (equação 4.3).

**Tabela 4.8- Valores experimentais**

Provete	Gama de tensão [MPa]	Nº de ciclos
1	194,4	5E6
2	218,7	2E6
3	218,7	não válido
4	218,7	5E6
5	405,0	-
6	405,0	-

O ensaio do provete 1 ocorreu sem problemas atingindo os 5 milhões de ciclos sem fracturar quando aplicada uma gama de tensão de 194,4 MPa. Como não fracturou até aos 5 milhões de ciclos, o ensaio foi interrompido porque atingiu-se o limite de fadiga. Este ensaio foi considerado válido para o estudo.

O ensaio do provete n.º 2 decorreu quase problemas e fracturou aos 2 milhões de ciclos. Após fracturar e uma vez aberto o forno verificou-se que o provete havia fracturado num dos furos devido a um defeito de fabrico (figura 4.9). A fractura era esperada na zona do pé do cordão de soldadura e ocorreu num dos furos partindo igualmente uma das cavilhas que se encontrava em contacto com os furos (figura 4.10). Devido a este último factor este ensaio foi considerado não válido para o estudo.



O ensaio do provete n.º 3 não chegou a completar 1 ciclo. Infelizmente, ao iniciar o ensaio, houve um aumento súbito da força aplicada, que ultrapassou a força máxima desejada, e que provocou a fractura do provete. Este ensaio foi considerado não válido para o estudo.

O ensaio do provete n.º 4 ocorreu sem problemas atingindo os 5 milhões de ciclos sem fracturar quando aplicada uma gama de tensão de 218,7 MPa. Como não fracturou até aos 5 milhões de ciclos, o ensaio foi interrompido porque após atingido este valor atinge-se o limite de fadiga. Este ensaio foi considerado válido para o estudo.

Infelizmente, não foi possível iniciar os ensaios dos provetes 5 e 6 devido a uma avaria do computador de controlo da máquina de ensaios de fadiga.

Para obtenção das curvas S-N estimadas de cada provete seguiram-se os seguintes passos:

- Traçou-se o ponto da classe de fadiga calculado no capítulo anterior num gráfico, sabendo que a classe de fadiga ocorre aos 2 milhões de ciclos;

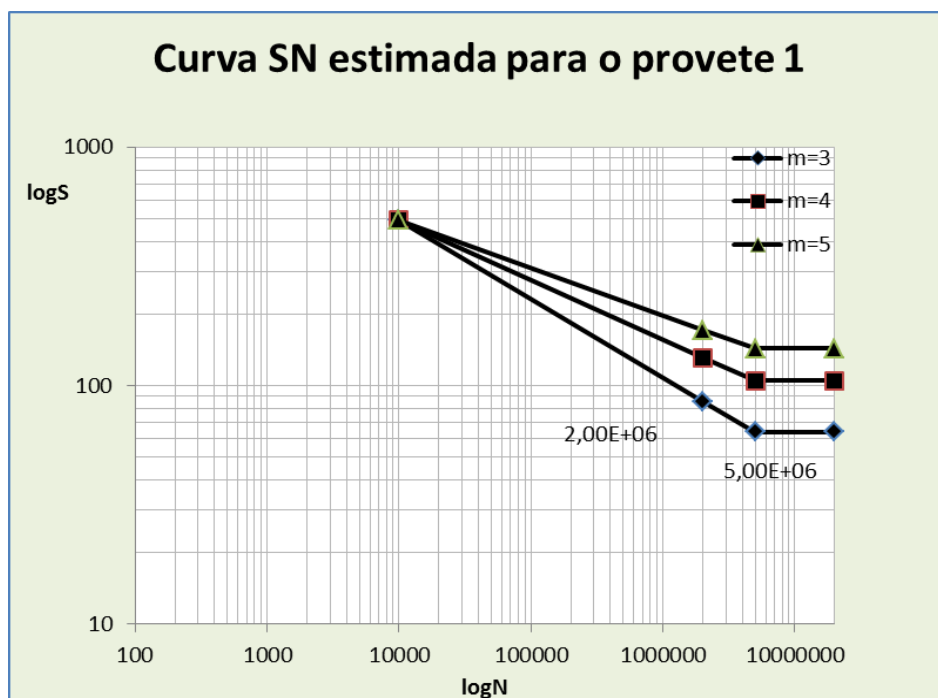


- Calculou-se a gama de tensão para um valor de duração de 10 000 ciclos aplicando um declive de 3 (ou 0,333), segundo as recomendações do IIW.
- A gama de tensão aos 10000 ciclos (ponto comum) vai ser usada para calcular a classe de fadiga se o declive for diferente de 3, ou seja, tendo o ponto comum para vários declives e aplicando então uma recta com declive de 4 (ou 0,25) e de 5 (ou 0,20) tem-se então a classe de fadiga (2 milhões de ciclos) e assim como, o limite de fadiga (5 milhões de ciclos).

Para a obtenção da equação que relaciona a gama de tensão com o número de ciclos foi usado uma recta de regressão linear com 3 pontos fixos com N igual a 10 000, 2 000 000 e 5 000 000 de ciclos.

**Tabela 4.9- Valores de fadiga estimados e experimentais do provete 1**

		FAT	limite de fadiga	10 000 ciclos	valor esperado	Equação
<b>PROVETE 1</b>	<b>m=3</b>	91	67	523	195241	$\log S = -0,3304(\log N) + 4,0404$
	<b>m=4</b>	139	111		551112	$\log S = -0,2497(\log N) + 3,717$
	<b>m=5</b>	181	151		1431209	$\log S = -0,2(\log N) + 3,5185$
	<b>experimental</b>	Partiu: NÃO		VÁLIDO	+ 5 000 000	



**Figura 4.11- Curva S-N estimada para o provete 1**

Tabela 4.10 - Valores de fadiga estimados e experimentais do provete 2

PROVETE		FAT	limite de fadiga	10000 ciclos	valor esperado	Equação
2	m=3	90	66	517	127144	$\log S = -0,3308(\log N) + 4,0369$
	m=4	138	109		480181	$\log S = -0,2501(\log N) + 3,714$
	m=5	180	149		719156	$\log S = -0,1998(\log N) + 3,513$
	experimental	Partiu: SIM	Localização: FURO	NÃO VÁLIDO	2,00E+06	

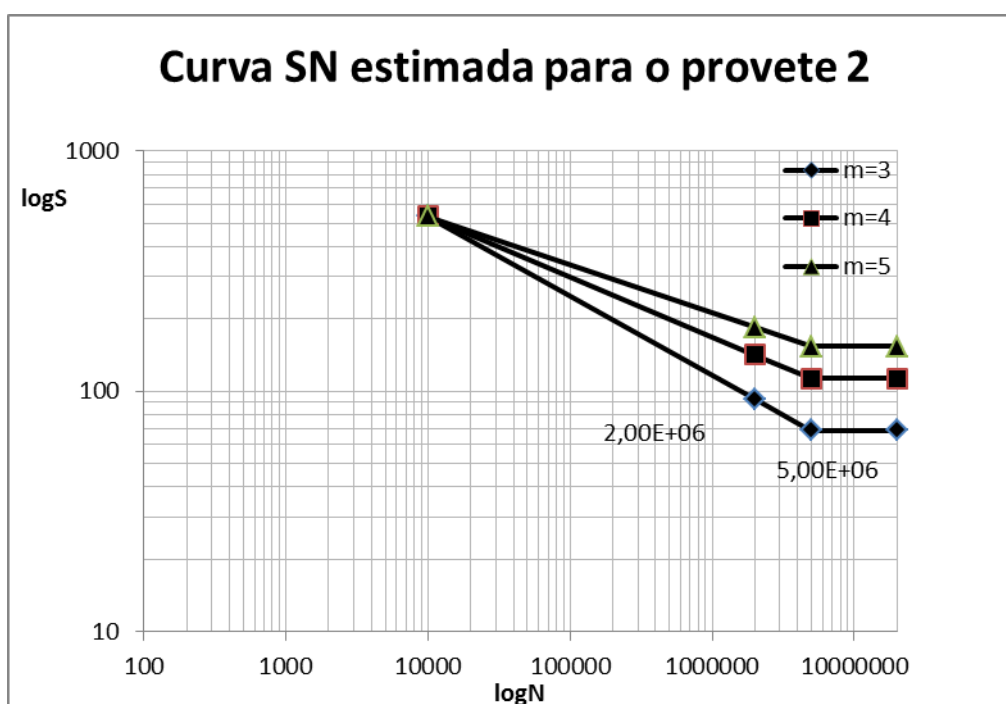


Figura 4.12- Curva SN estimada para o provete 2

Tabela 4.11- Valores de fadiga estimados e experimentais do provete 3

PROVETE		FAT	limite de fadiga	10000 ciclos	valor esperado	Equação
3	m=3	93	69	534	149926	$\log S = -0,3295(\log N) + 4,0453$
	m=4	142	113		356144	$\log S = -0,2499(\log N) + 3,7272$
	m=5	185	154		865541	$\log S = -0,2001(\log N) + 3,5279$
	experimental	Partiu: SIM	Localização: PÉ	NÃO VÁLIDO		

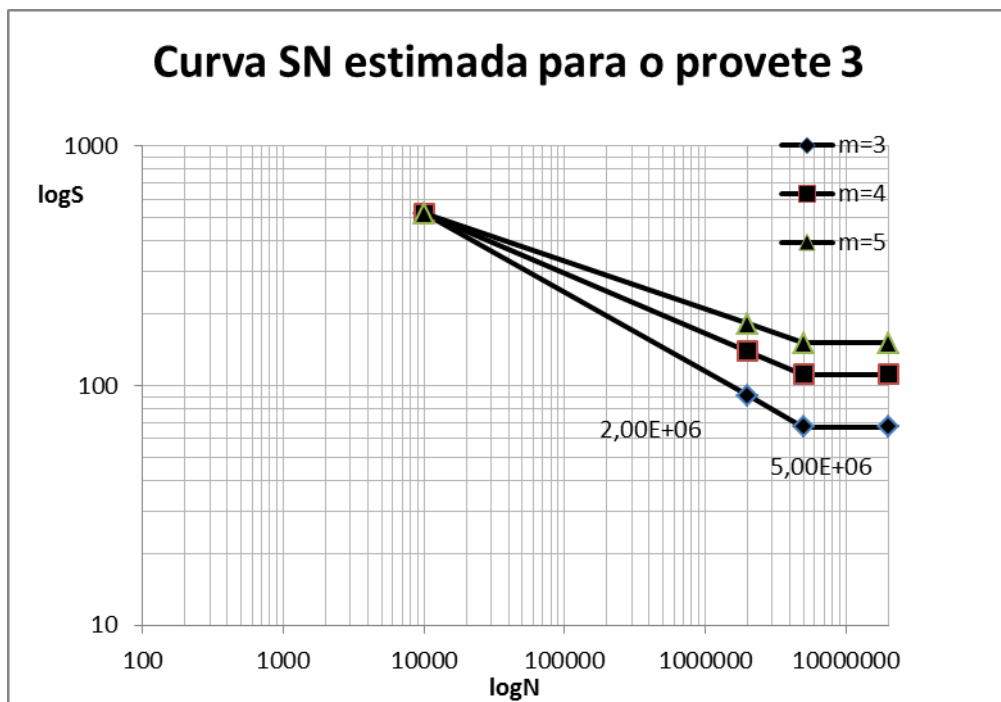


Figura 4.13- Curva SN estimada para o provete 3

Tabela 4.12- Valores de fadiga estimados e experimentais do provete 4

PROVETE 4		FAT	limite de fadiga	10 000 ciclos	valor esperado	Equação
	m=3	92	68	529	204195	$\log S = -0,3301(\log N) + 4,0439$
	m=4	141	112		403131	$\log S = -0,2497(\log N) + 3,7224$
	m=5	183	153		802091	$\log S = -0,1999(\log N) + 3,5228$
	experimental	Partiu: NÃO	Localização: ?	VÁLIDO	+ 5 000 000	

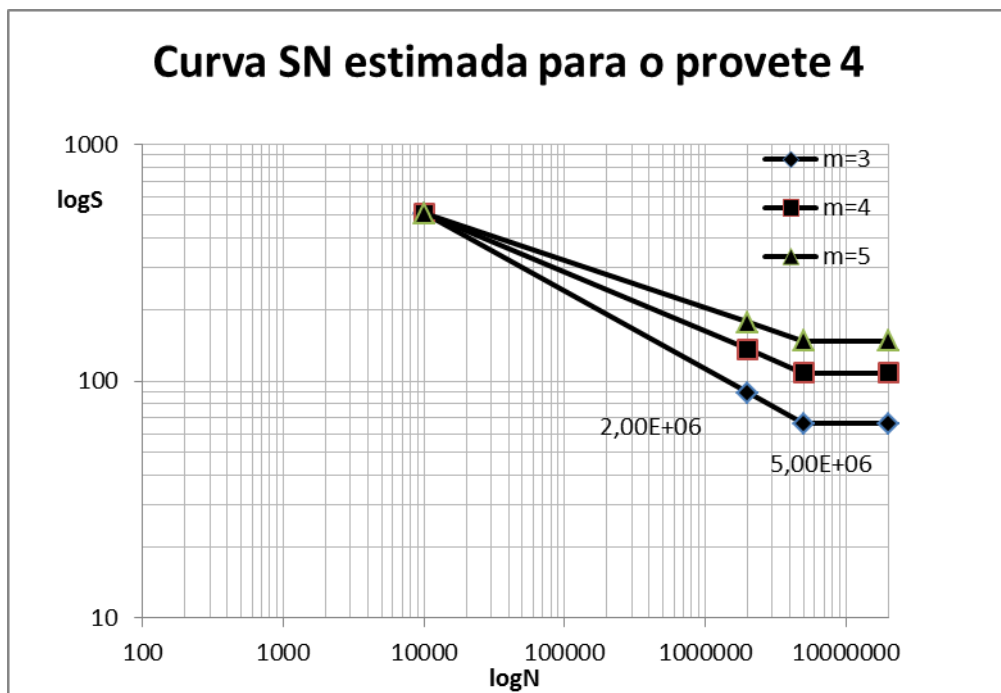


Figura 4.14- Curva SN estimada para o provete 4

Tabela 4.13-Valores de fadiga estimados e experimentais do provete 5

PROVETE 5		FAT	limite de fadiga	10000 ciclos	valor esperado	Equação
	m=3	94	70	549	25482	$\log S = -0,3300(\log N) + 4,0647$
	m=4	146	116		34490	$\log S = -0,2498(\log N) + 3,7432$
	m=5	189	158		46879	$\log S = -0,2002(\log N) + 3,5457$
	experimental					

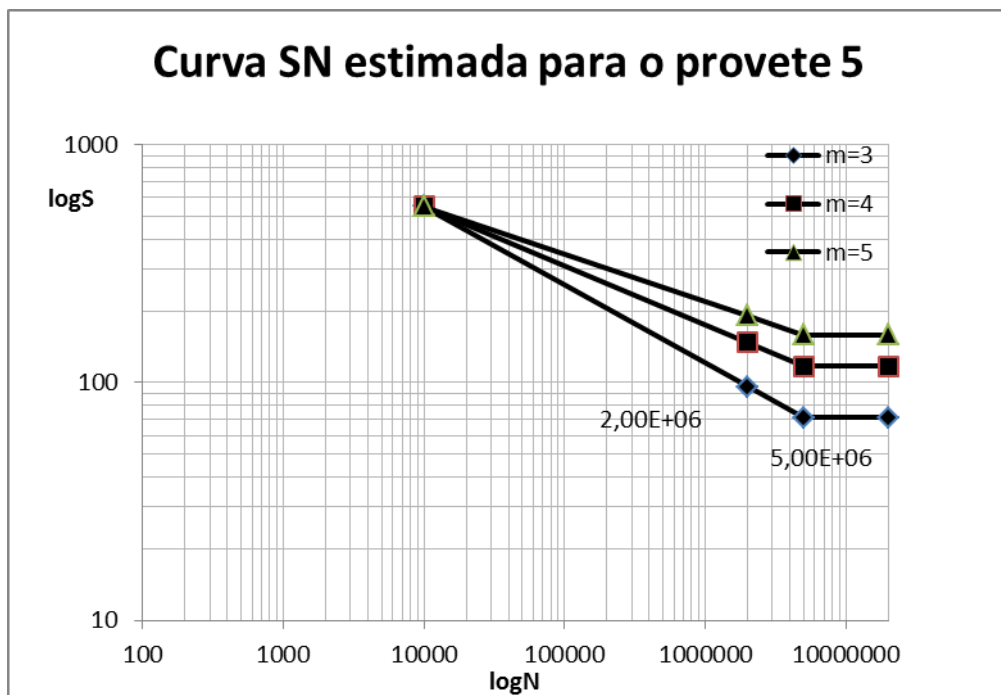


Figura 4.15- Curva SN estimada para o provete 5

Tabela 4.14- Valores de fadiga estimados e experimentais do provete 6

PROVETE 6		FAT	limite de fadiga	10000 ciclos	valor esperado	Equação
	m=3	90	66	517	20445	$\log S = -0,3308(\log N) + 4,0369$
	m=4	138	109		27196	$\log S = -0,2501(\log N) + 3,714$
	m=5	180	149		35151	$\log S = -0,1998(\log N) + 3,513$
	experimental					

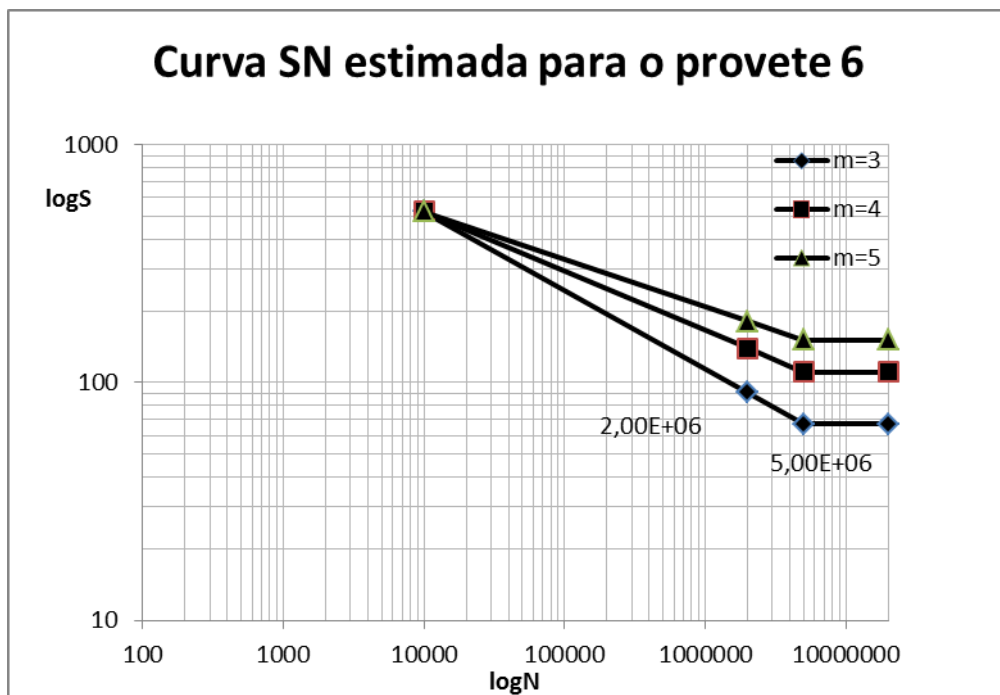


Figura 4.16- Curva SN estimada para o provete 6

➤ Análise estatística da curva SN experimental

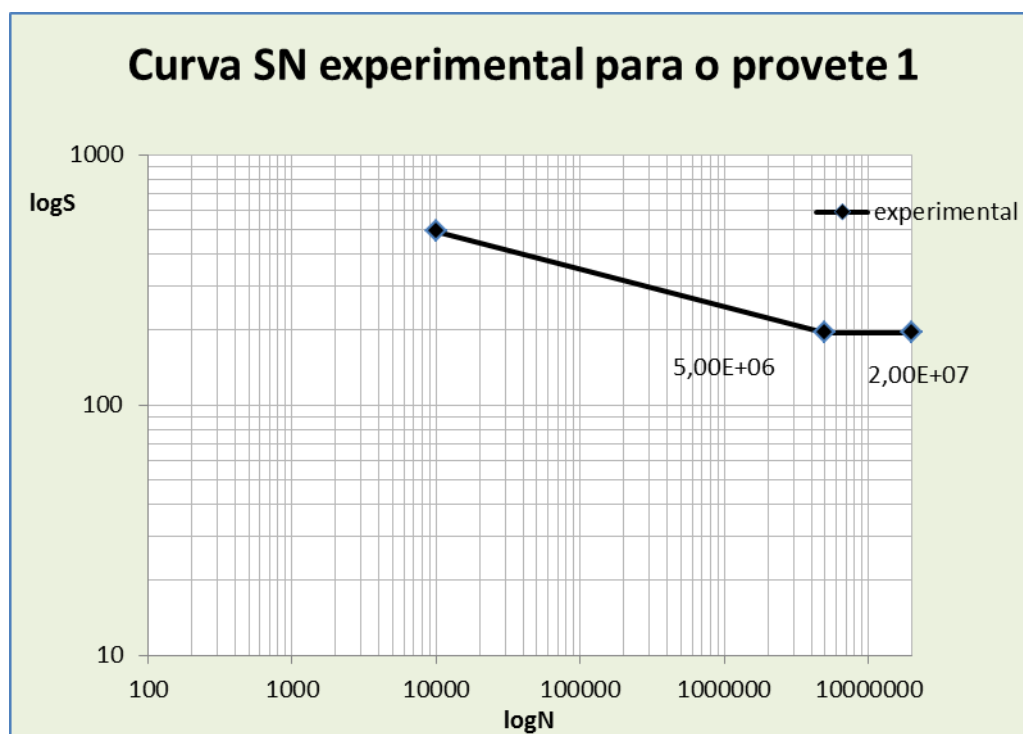


Figura 4.17- Curva SN experimental

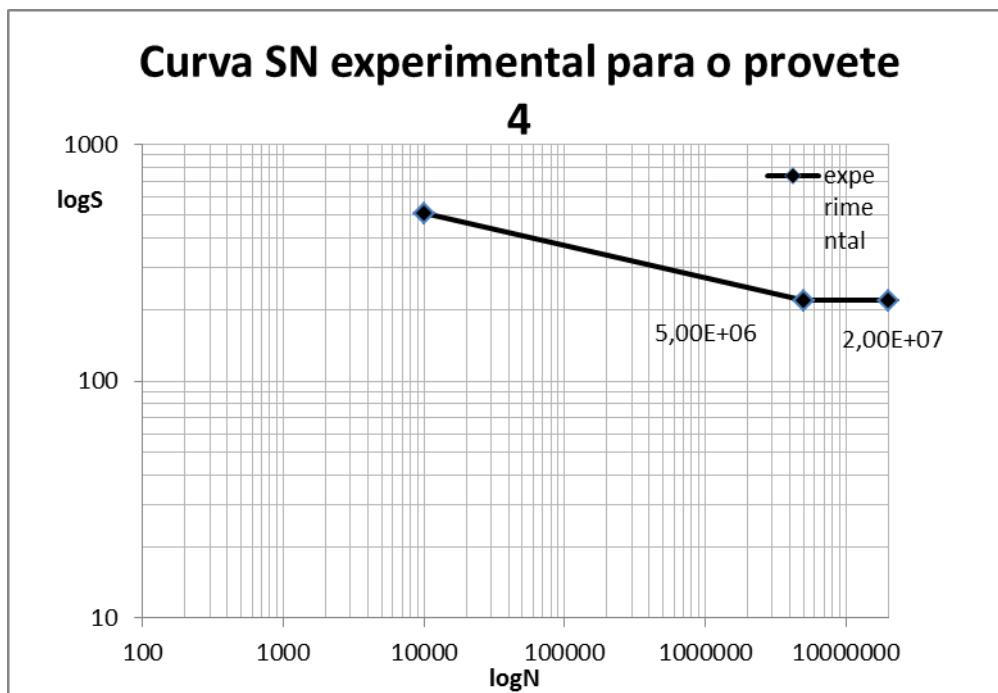


Figura 4.18- Curva SN experimental para o provete 4

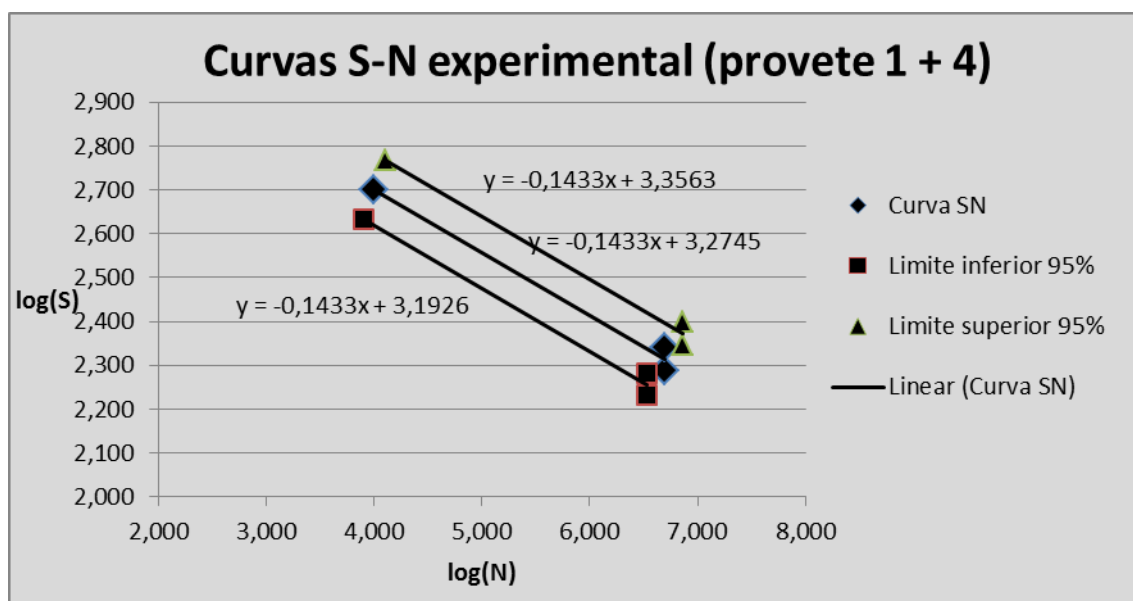


Figura 4.19- Curva SN experimental





## **5 CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHO FUTURO**



Concluiu-se que, devido ao processo de soldadura, foi possível verificar que as zonas termicamente afectadas sofreram um amaciamento estrutural devido aos efeitos decorrentes da operação. Pode-se concluir também que, a chapa principal (Cr-Mn) apresenta valores de dureza maiores que o material do cutelo (AISI 316L). No que diz respeito ao ataque químico da peça, conseguiu-se evidenciar os diferentes materiais constituintes do provete (Figura 4.5 e 4.6).

O método da abordagem da tensão estrutural pode considerar-se válido. Nesta abordagem pode-se verificar que a tensão estrutural fica claramente abaixo da tensão local no pé do cordão de soldadura como era esperado (tabela 3.2 e 3.4). A classe de fadiga teórica seguindo as recomendações do IIW [2] tem valores compreendidos entre 90 e 94 MPa.

Quanto à geometria dos provetes, conclui-se que o facto de a geometria do cordão de soldadura ser convexa, com raio de curvatura de valor elevado, faz com que o factor de concentração de tensões no cordão de soldadura seja menor do que no caso de termos cordões de soldadura a fazerem 45° com o cutelo e com a chapa principal (tabela 3.3 e 3.5).

Os ensaios de fadiga foram realizados a uma frequência de 5 Hz, isto é, cada ensaio que atingiu a vida infinita (provetes 1 e 4) correspondeu a 277,78 horas (aproximadamente 11 dias e meio) de ensaio que necessitavam de ser vigiados duas vezes ao dia de forma a verificar se a força aplicada se mantinha a mesma. Devido aos problemas que existem nos ensaios experimentais de fadiga, antes de cada ensaio colocou-se um provete de teste a efectuar cerca de 10000 ciclos (cerca de 33 min) antes do ensaio do provete desejado. Todos os ensaios foram realizados com o forno a uma temperatura de aproximadamente constante de 350°C.

Na análise à fadiga do presente estudo encontrou-se divergências entre os resultados experimentais e os resultados teóricos. Como se pode observar pela figura 4.19 o declive da curva SN experimental é diferente do declive das curvas SN fornecidas pelo IIW [2], que apresentam declives com o valor numérico de 3. De igual modo, os ensaios experimentais dos provetes 1 e 4, que atingiram vida infinita (5000000 ciclos), quando teoricamente deviam ter atingido 195241 ciclos (para  $m=3$ , tabela 4.9 e figura 4.11) e 204195 ciclos (tabela 4.12 e figura 4.14), indicia a necessidade de se completarem os ensaios que, por avaria da máquina de ensaios servohidráulica, não foi possível completar. Desta forma, a amostra de resultados experimentais será mais significativa e poder-se-ão aferir os resultados anteriormente obtidos.



## **6 ANEXOS**



## A. Coordenadas dos provetes através da mesa de coordenadas



**Figura 6.1- Ponto 1 do provete 1**

**Tabela 6.1- Coordenadas do provete 2 da vista de topo do provete**

Ponto	X	Y	RAIO
1	0	0	-
2	1.327	30.190	-
3	30.410	28.695	-
4	29.432	-1.410	-
5	-	-	62.907
6	-	-	59.765
7	70.587	15.250	-
8	70.318	8.445	-
9	81.539	14.785	-
10	81.124	8.030	-

<b>11</b>	-	-	62.568
<b>12</b>	-	-	55.035
<b>13</b>	115.134	24.725	-
<b>14</b>	114.199	-5.295	-
<b>15</b>	144.406	23.325	-
<b>16</b>	143.134	-6.735	-
<b>17</b>	16.728	14.270	3.361
<b>18</b>	127.619	9.215	3.288



**Figura 6.2- Ampliação do provete 2**



**Figura 6.3- Ampliação dos pontos C e D do provete 2**

**Tabela 6.2- Coordenadas do provete 2 da vista lateral do provete**

<b>Ponto</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>RAIO</b>
<b>A</b>	-0.373	-2.495	-
<b>B</b>	0	0	-
<b>C</b>	28.285	-3.635	-
<b>D</b>	28.351	-1.145	-



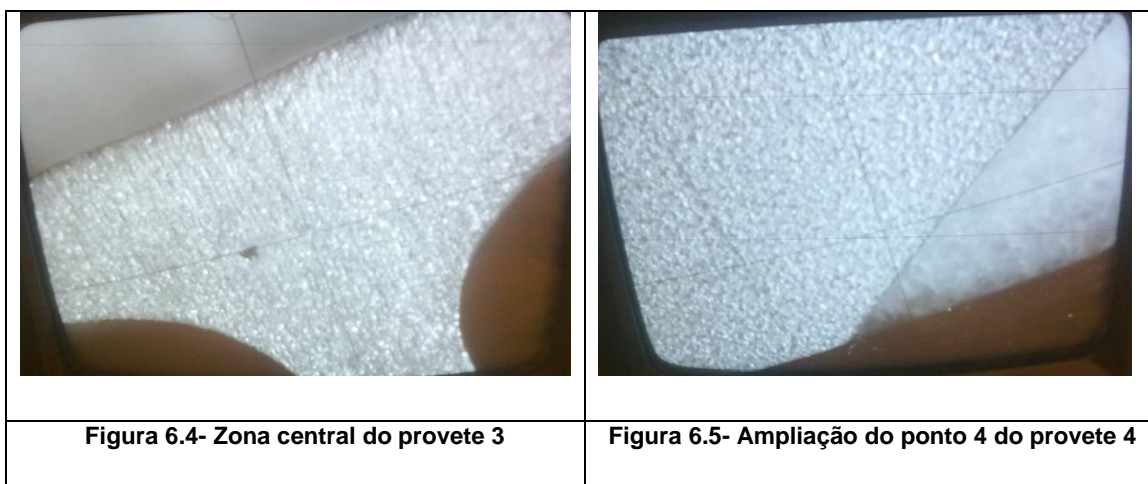
<b>E</b>	-	-	4.027
<b>F</b>	71.299	39.306	-
<b>G</b>	73.834	39.300	-
<b>H</b>	-	-	3.569
<b>I</b>	113.064	-7.495	-
<b>J</b>	113.254	-5.015	-
<b>K</b>	142.377	-8.691	-
<b>L</b>	142.191	-6.185	-

**Tabela 6.3- Coordenadas do provete 3 da vista de topo do provete**

<b>Ponto</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>RAIO</b>
<b>1</b>	0	0	-
<b>2</b>	-0.440	30.042	-
<b>3</b>	28.634	30.352	-
<b>4</b>	29.147	0.368	-
<b>5</b>	-	-	59.208
<b>6</b>	-	-	54.043
<b>7</b>	61.345	19.012	-
<b>8</b>	61.274	12.297	-
<b>9</b>	72.365	18.792	-
<b>10</b>	72.195	11.647	-
<b>11</b>	-	-	55.258
<b>12</b>	-	-	55.879
<b>13</b>	113.651	31.172	-
<b>14</b>	114.157	1.357	-
<b>15</b>	142.991	31.424	-
<b>16</b>	143.182	1.357	-
<b>17</b>	15.772	15.222	3.318
<b>18</b>	127.115	16.397	3.363

**Tabela 6.4- Coordenadas do provete 3 da vista lateral do provete**

<b>Ponto</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>RAIO</b>
<b>A</b>	-0.224	-2.431	-
<b>B</b>	0	0	-
<b>C</b>	28.762	-2.241	-
<b>D</b>	28.891	0.181	-
<b>E</b>	-	-	4.034
<b>F</b>	66.358	36.205	-
<b>G</b>	68.995	36.435	-
<b>H</b>	-	-	4.079
<b>I</b>	114.080	-2.751	-
<b>J</b>	113.838	-0.246	-
<b>K</b>	143.164	-3.372	-
<b>L</b>	143.177	-0.936	-



**Tabela 6.5- Coordenadas do provete 4 da vista de topo do provete**

<b>Ponto</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>RAIO</b>
<b>1</b>	0	0	-
<b>2</b>	0.241	30.115	-
<b>3</b>	29.348	29.575	-
<b>4</b>	29.179	-0.305	-
<b>5</b>	-	-	55.709
<b>6</b>	-	-	53.794
<b>7</b>	70.474	17.684	-
<b>8</b>	70.314	10.780	-
<b>9</b>	81.439	17.470	-
<b>10</b>	81.121	10.682	-
<b>11</b>	-	-	54.845
<b>12</b>	-	-	58.752
<b>13</b>	114.320	28.741	-
<b>14</b>	114.324	-1.295	-
<b>15</b>	143.480	28.270	-
<b>16</b>	143.214	-1.630	-
<b>17</b>	16.210	14.860	3.308
<b>18</b>	127.254	13.610	3.298

**Tabela 6.6- Coordenadas do provete 4 da vista lateral do provete**

<b>Ponto</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>RAIO</b>
<b>A</b>	-0.142	-2.510	-
<b>B</b>	0	0	-
<b>C</b>	28.896	-2.355	-
<b>D</b>	29.008	0.090	-
<b>E</b>	-	-	4.350
<b>F</b>	73.794	3.740	-
<b>G</b>	76.305	36.630	-
<b>H</b>	-	-	4.033
<b>I</b>	113.703	-3.195	-
<b>J</b>	113.810	-0.739	-
<b>K</b>	143.080	-3.660	-
<b>L</b>	142.925	-1.288	-

**Tabela 6.7- Coordenadas do provete 5 da vista de topo do provete**

<b>Ponto</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>RAIO</b>
<b>1</b>	0	0	-
<b>2</b>	0.290	30.351	-
<b>3</b>	29.423	29.825	-
<b>4</b>	29.319	-0.417	-
<b>5</b>	-	-	65.028
<b>6</b>	-	-	52.310
<b>7</b>	63.280	17.875	-
<b>8</b>	63.246	10.825	-
<b>9</b>	74.327	17.675	-
<b>10</b>	74.324	10.695	-
<b>11</b>	-	-	57.186
<b>12</b>	-	-	52.945
<b>13</b>	114.469	28.740	-
<b>14</b>	114.313	-1.525	-
<b>15</b>	143.721	28.285	-
<b>16</b>	143.352	-1.775	-
<b>17</b>	16.426	14.970	3.318
<b>18</b>	127.413	13.454	3.304

**Tabela 6.8- Coordenadas do provete 5 da vista lateral do provete**

<b>Ponto</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>RAIO</b>
<b>A</b>	-0.324	2.420	-
<b>B</b>	0	0	-
<b>C</b>	28.618	2.510	-
<b>D</b>	28.707	0.048	-
<b>E</b>	-	-	4.459
<b>F</b>	67.219	36.796	-
<b>G</b>	69.638	36.915	-
<b>H</b>	-	-	3.936
<b>I</b>	113.681	3.908	-
<b>J</b>	113.865	1.440	-
<b>K</b>	143.036	4.246	-
<b>L</b>	142.969	1.765	-

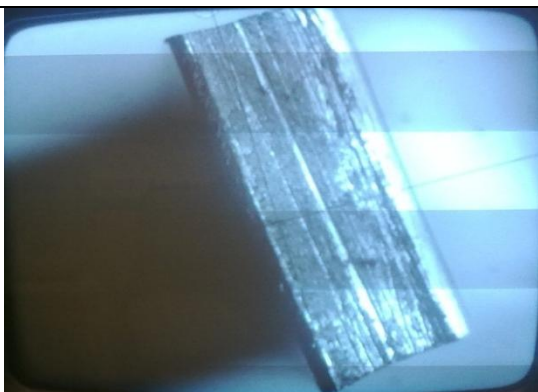
**Tabela 6.9- Coordenadas do provete 6 da vista de topo do provete**

<b>Ponto</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>RAIO</b>
<b>1</b>	0	0	-
<b>2</b>	0.587	29.993	-
<b>3</b>	29.539	29.208	-
<b>4</b>	29.195	-0.742	-
<b>5</b>	-	-	55.617
<b>6</b>	-	-	66.931
<b>7</b>	62.862	16.763	-
<b>8</b>	62.503	9.998	-
<b>9</b>	73.410	16.503	-
<b>10</b>	73.332	9.738	-
<b>11</b>	-	-	59.473
<b>12</b>	-	-	52.631
<b>13</b>	114.666	27.023	-
<b>14</b>	113.968	-2.910	-
<b>15</b>	143.886	26.148	-
<b>16</b>	143.057	-3.807	-
<b>17</b>	16.309	14.430	3.330
<b>18</b>	127.450	11.558	3.268



**Tabela 6.10- Coordenadas do provete 6 da vista lateral do provete**

<b>Ponto</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>RAIO</b>
<b>A</b>	-0.264	2.401	-
<b>B</b>	0	0	-
<b>C</b>	28.609	3.395	-
<b>D</b>	28.771	0.922	-
<b>E</b>	-	-	3.534
<b>F</b>	65.894	38.207	-
<b>G</b>	68.612	38.515	-
<b>H</b>	-	-	4.222
<b>I</b>	113.506	6.190	-
<b>J</b>	113.810	3.740	-
<b>K</b>	142.823	7.292	-
<b>L</b>	142.874	4.800	-



**Figura 6.6- Cutelo do provete 6**



## B. Coordenadas da zona sem penetração dos provetes

Tabela 6.11- Pontos da zona sem penetração do provete 1

Lado	Pontos	X	Y
Esquerdo	I	65.542	3.235
	II	65.849	3.294
	III	65.770	3.304
Direito	IV	-	-
	V	-	-
	VI	-	-

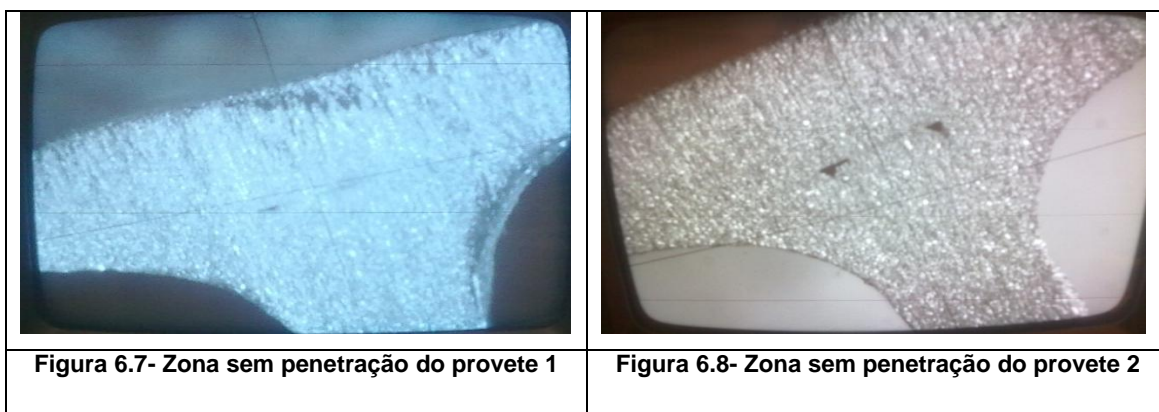


Tabela 6.12- Pontos da zona sem penetração do provete 2

Lado	Pontos	X	Y
Esquerdo	I	73.463	4.465
	II	73.801	4.465
	III	73.657	4.605
Direito	IV	75.417	4.540
	V	75.848	4.545
	VI	75.548	4.720

**Tabela 6.13- Pontos da ligação não soldada do provete 3**

<b>Lado</b>	<b>Pontos</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
<b>Esquerdo</b>	I	65.859	1.334
	II	66.149	1.336
	III	66.051	1.506
<b>Direito</b>	IV	-	-
	V	-	-
	VI	-	-



**Figura 6.9- Zona sem penetração do provete 3**



**Figura 6.10- Zona sem penetração do provete 4**

**Tabela 6.14- Pontos da zona sem penetração do provete 4**

<b>Lado</b>	<b>Pontos</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
<b>Esquerdo</b>	I	74.731	1.690
	II	74.906	1.711
	III	74.767	1.825
<b>Direito</b>	IV	76.754	1.751
	V	77.002	1.740
	VI	76.850	1.865

**Tabela 6.15- Pontos da zona sem penetração do provete 5**

<b>Lado</b>	<b>Pontos</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
<b>Esquerdo</b>	I	67.429	1.940
	II	67.863	1.990
	III	67.446	2.150
<b>Direito</b>	IV	-	-
	V	-	-
	VI	-	-



**Figura 6.11- Zona sem penetração do provete 5**



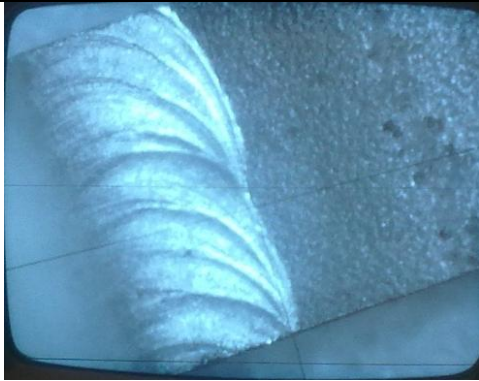
**Figura 6.12- Zona sem penetração do provete 6**

**Tabela 6.16- Pontos da zona sem penetração do provete 6**

<b>Lado</b>	<b>Pontos</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
<b>Esquerdo</b>	I	66.389	3.505
	II	66.812	3.506
	III	66.540	3.750
<b>Direito</b>	IV	-	-
	V	-	-
	VI	-	-



### C. Características particulares dos provetes



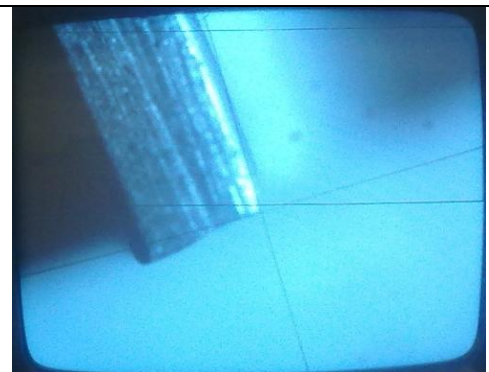
**Figura 6.13- Cordão de soldadura do provete 6**



**Figura 6.14- Observação das imperfeições devido ao jacto de água no provete 1**



**Figura 6.15- Observação da zona circular do provete 1 com imperfeições**

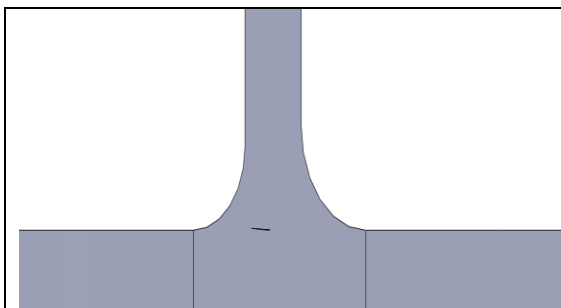


**Figura 6.16- Imperfeição no cutelo do provete 5**

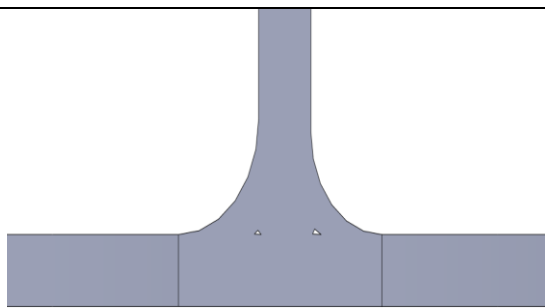




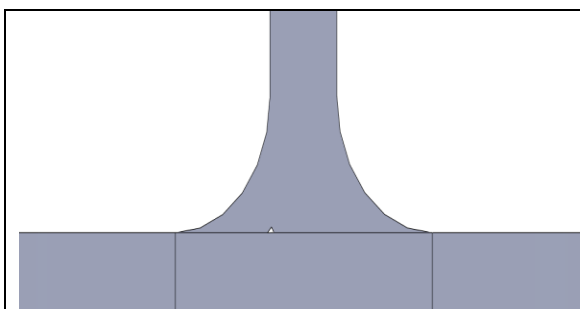
#### D. Geometria da zona sem penetração dos provetes



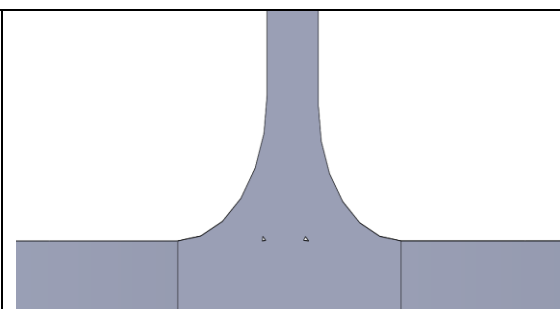
**Figura 6.17- Modelação em SolidWorks da zona sem penetração do provete 1**



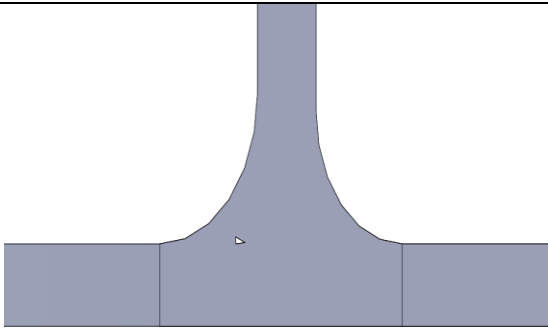
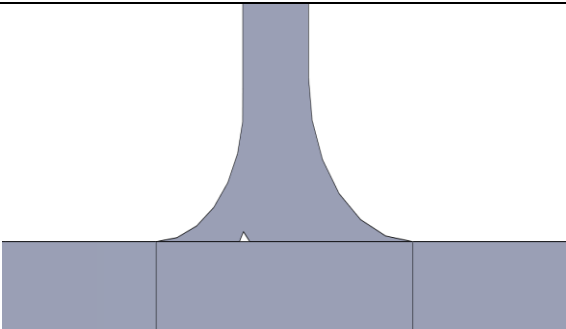
**Figura 6.18- Modelação em SolidWorks da zona sem penetração do provete 2**



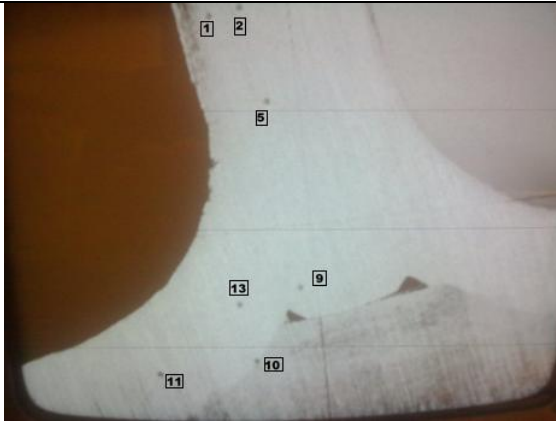
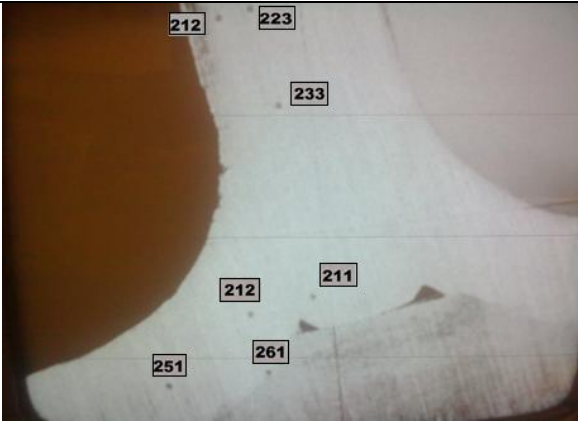
**Figura 6.19- Modelação em SolidWorks da zona sem penetração do provete 3**

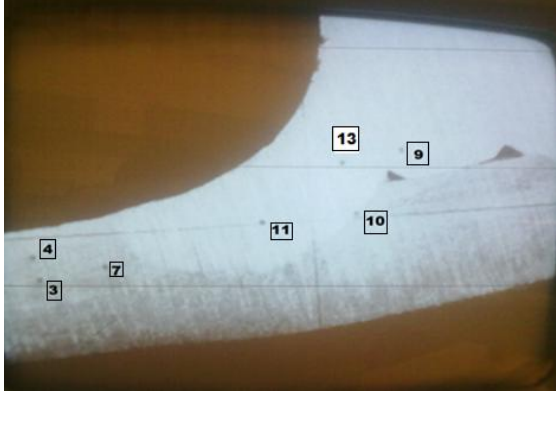
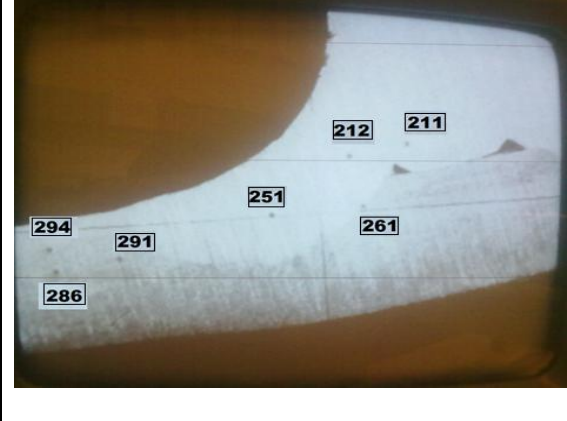


**Figura 6.20- Modelação em SolidWorks da zona sem penetração do provete 4**

	
<p><b>Figura 6.21- Modelagem em SolidWorks da zona sem penetração do provete 5</b></p>	<p><b>Figura 6.22- Modelagem em SolidWorks da zona sem penetração do provete 6</b></p>

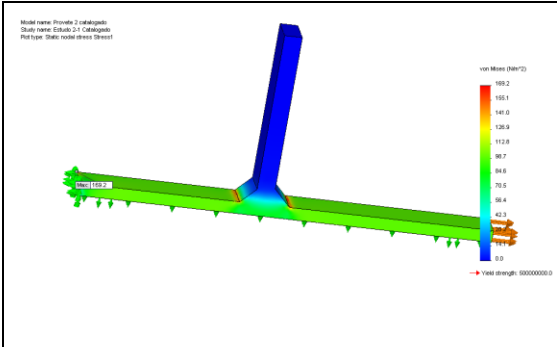
**E. Indentações individuais dos ensaios de dureza**

	
<p><b>Figura 6.23- Indentações 1, 2, 5, 9, 10, 11, 13</b></p>	<p><b>Figura 6.24- Valores de dureza das indentações 1, 2, 5, 9, 10, 11, 13</b></p>

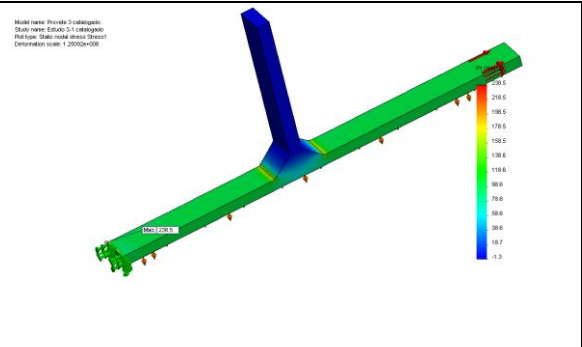
	
<p><b>Figura 6.25- Indentações 3, 4, 7, 9, 10, 11, 13</b></p>	<p><b>Figura 6.26- Valores de dureza das indentações 3, 4, 7, 9, 10, 11, 13</b></p>



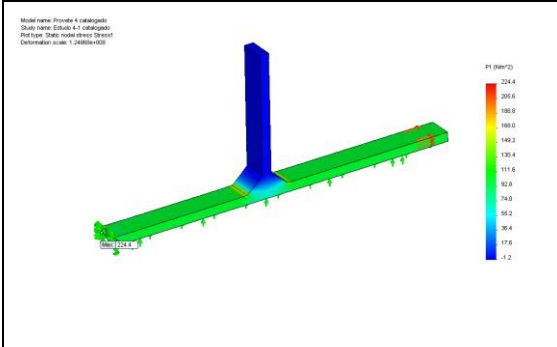
# F. Análise por meio de métodos finitos dos provetes catalogados e ensaiados



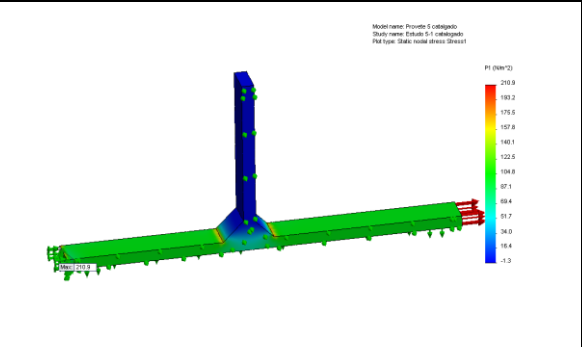
**Figura 6.27- Análise da tensão principal máxima do provete catalogado 2**



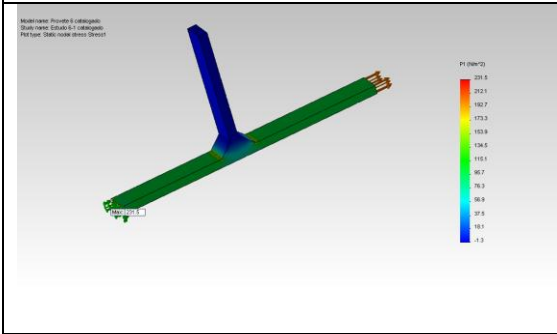
**Figura 6.28- Análise da tensão principal máxima do provete catalogado 3**



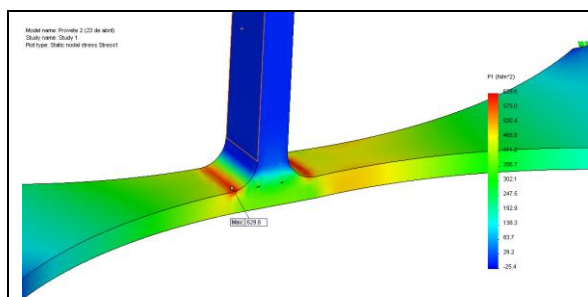
**Figura 6.29- Análise da tensão principal máxima do provete catalogado 4**



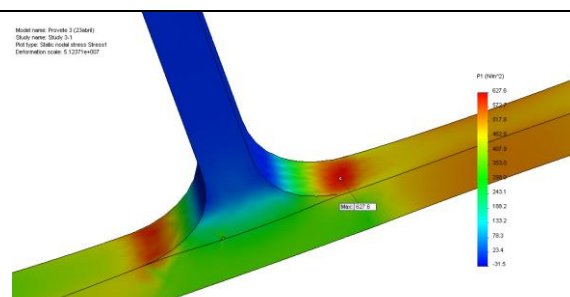
**Figura 6.30- Análise da tensão principal máxima do provete catalogado 5**



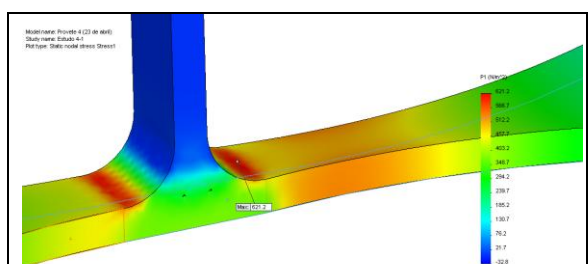
**Figura 6.31- Análise da tensão principal máxima do provete 6**



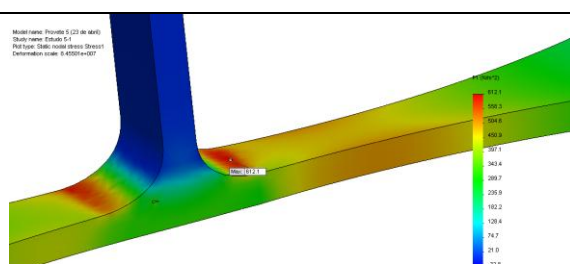
**Figura 6.32- Análise da tensão principal máxima do provete 2 ensaiado (cordão)**



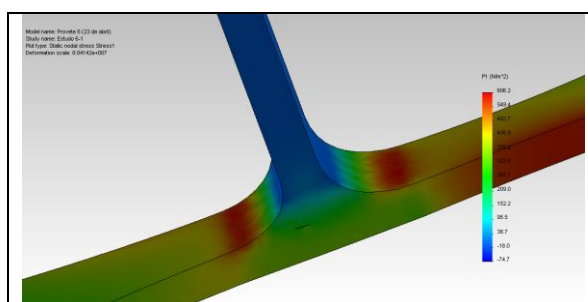
**Figura 6.33- Análise da tensão principal máxima do provete 3 ensaiado (cordão)**



**Figura 6.34- Análise da tensão principal máxima do provete 4 ensaiado (cordão)**



**Figura 6.35- Análise da tensão principal máxima do provete 5 ensaiado (cordão)**



## Bibliografia

- [1] S. Dowling, Mechanical Behaviour of Materials, p. 626-629.
- [2] A. Hobbacher, Fatigue design of welded joints and components, Recommendations for fatigue strength of welded components, Cambridge: Abington Publishers, p.17-103, 1996.
- [3] D. Radaj, "Review of fatigue strength assessment of nonwelded and welded structures based on local parameters," 1995.
- [4] W. Fricke, "Fatigue analysis of welded joints: state of development," 2003.
- [5] T. Gurney, "Fatigue of welded structures," 1979.
- [6] R. Olivier, Catalogue of S-N curves of welded joints in structural steels, Dusseldorf: DVS, 1982..
- [7] A. Hobbacher, "Determination of stresses and stress intensity factors- Nominal Stress," in *Fatigue design of welded joints and components - Fatigue Actions (Loading)*, 1996, pp. 20-22.
- [8] A. Hobbacher, "Fatigue resistance of classified structural details," in *Fatigue design of welded joints and components*, 1996, pp. 34-56.
- [9] A. Miner, "Cumulative damage in fatigue," 1945, p.151-164.
- [10] T. Bruder, "Evaluation of nominal and local stress based approaches for the fatigue assessment of seam welds," 2012.
- [11] A. Hobbacher, "Effective Notch Stress," in *Fatigue design of welded joints and components- Fatigue Actions (Loading)*, 1996, pp. 28-29.
- [12] A. Hobbacher, "Fatigue resistance against effective notch stress," in *Fatigue design of welded joints and components*, 1996, p. 75.
- [13] H. Neuber, Theory of Notch Stresses, Springer Verlag, 2nd Edition, 1958.
- [14] R. Olivier, "Schweisssverbindung I.," 1989.
- [15] T. Seeger, "Generalized application of Neuber's rule," 1980, p. 199-204.
- [16] A. Hobbacher, "Geometric stress (hot spot stress)," in *Fatigue design of welded joints and components- Fatigue actions (Loading)*, 1996, pp. 23-28.
- [17] A. Hobbacher, "Fatigue resistance against geometric stress (hot spot stress)," in *Fatigue design of welded joints and components*, 1996, pp. 73-74.

- [18] O. Dijkstra, "Fatigue strength of welded tubular T- and X- joints," Houston, 1980.
- [19] M. Vormwald, "A fracture mechanics based fatigue life prediction for offshore tubular joints," 1991, p. 451-457.
- [20] G. Savaidis, "Hot-spot stress evaluation of fatigue in welded structural connections supported by finite element analysis," 2000, p. 85-91.
- [21] A. d. S. Ribeiro, "Efeito da fase de iniciação na previsão do comportamento à fadiga de estruturas soldadas, Vila Real: UTAD, 1993.
- [22] A. S. Handbook, Stainless Steels, ed. J. R. Davis, 1996 ASM International ( ISBN 0-87170-503-6).
- [23] N. EN1043-1:1999, "Ensaio de dureza Parte 1: Ensaio de dureza das ligações soldadas," in *Ensaio destrutivos das soldaduras sobre materiais metálicos*.
- [24] A. Rupp, "Ermittlung von ertragbaren schnittkräften für die betriebsfeste bemessung von punktschweißverbindungen im automobilbau," 1989.
- [25] J. M. C. R. F. Martins, "ANALYSIS OF THE MECHANICAL PROPERTIES AND OF The fatigue resistance of two austenitic stainless steels tested at high temperature," *Proceedings of the XIII Portuguese Conference on Fracture*, pp. 321-326, February 2012.
- [26] F. Lawrence, "Application of strain-controlled fatigue concepts to the prediction of weldment fatigue life," 1979, p. 468-478.
- [27] M. Kaffenberger, "Fatigue resistance of weld ends," 2012.
- [28] M. Stoschka, "Contribution to the capability of filler metals to influence fatigue of butt joints".
- [29] A. Rupp, "Rechnergestützte auslegung punktgeschweisster bauteile," 1994, p.159-175.
- [30] E. Niemi, "Recommendations concerning stress determination for fatigue analysis of welded components," 1996.
- [31] R. Peterson, Handbook of stress concentration factors, new york: John Wiley Ltd, 1974.
- [32] F. Lawrence, "Estimation of fatigue initiation life of welds," 1978, p. 134-158.